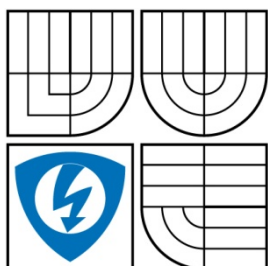


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VLIV TEPELNÉHO NAMÁHÁNÍ NA VNITŘNÍ A POVRCHOVÝ ODPOR POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

INFLUENCE OF THERMAL STRESS ON VOLUME AND SURFACE RESISTANCE OF
MATERIAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

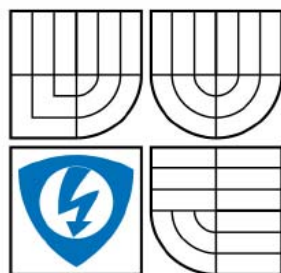
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ ROHEL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Rohel Tomáš Bc.
Ročník: 2

ID: 47106
Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Vliv tepelného namáhání na vnitřní a povrchový odpor polymerních materiálů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami měření funkčních vlastností materiálů pro pouzdření solárních článků, normami pro degradační testy a zpracujte literární rešerši. Ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o. Rožnově p. R. vyberte pouzdřicí materiály a proveďte vyhodnocení vnitřního a povrchového odporu v průběhu zrychleného stárnutí. Stanovte předpokládanou životnost funkčních vzorků s testovanými materiály. Zjištěné výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Tomáš Rohel
Bytem: Sportovní 6, 74101 Nový Jičín
Narozen/a (datum a místo): 15.9.1982, Nový Jičín

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vliv tepelného namáhání na vnitřní a povrchový odpor
polymerních materiálů

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Vaněk, Ph.D..

Ústav: Elektrotechnologie

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- | | | | |
|--|---|-----------------|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> tištěné formě | – | počet exemplářů | 2 |
| <input checked="" type="checkbox"/> elektronické formě | – | počet exemplářů | 2 |

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29.5.2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT:

Předkládaná práce popisuje metody měření a testování ochranných vrstev použitých v solárních panelech. V dalším bodě je vypracovaná rešerše norem pro degrační testy. Hlavním úkolem diplomové práce je proměřit měrný vnitřní a povrchový odpor u zvolených materiálů a určit předpokládanou životnost těchto materiálů. Vyhodnocení vlastností probíhá po zrychleném stárnutí působením suchého tepla. Vzorky materiálů byly připraveny ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o.

ABSTRACT:

This document describes the methods to test and measure the protective glasses used in solar panels. The next part of the dissertation covers the evolve summary for the norms of degradation tests. The purpose of this research is to scale the volume and surface electric resistivity of selected materials, as well as, specify the supposed durability of these materials. Evaluation of these features proceeds after enhanced aging by the use of dry heat. Samples of these materials were prepared with the cooperation of the company Solartec s.r.o

Klíčová slova:

fotovoltaické články, degradace dielektrik, měrný odpor, povrchový odpor, vnitřní odpor, zrychlené stárnutí, suché teplo, EVA, TPU

Keywords:

solar cell, degradation of dielectric, volume electric resistivity, surface electric resistivity, elevated aging, dry heat, EVA, TPU

Bibliografická citace díla:

ROHEL, T. *Vliv tepelného namáhání na vnitřní a povrchový odpor polymerních materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne: 29.5.2008

.....
(podpis autora)

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D., za užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce. Zvláštní poděkování patří firmě Solartec s.r.o. konkrétně Ing. Jiřímu Šenkýřovi za pomoc při vyhotovení vzorků a poskytnutí odborných informací potřebných pro zpracování diplomové práce.

Obsah

| | |
|---|----|
| 1 Úvod | 10 |
| 1.1 Cíle | 10 |
| 2 Teoretická část..... | 11 |
| 2.1 Historie vzniku fotovoltaického článku..... | 11 |
| 2.2 Fotovoltaický modul..... | 12 |
| 2.2.1 Základní princip fotovoltaického jevu | 12 |
| 2.2.2 Zapouzdřování modulu..... | 13 |
| 2.2.3 Vlastnosti pouzdrů materiálů..... | 14 |
| 2.2.3.1 EVA | 14 |
| 2.2.3.2 TPU | 15 |
| 2.2.3.3 PVB..... | 15 |
| 2.2.3.4 Pertex | 16 |
| 2.2.3.5 SentryGlas..... | 16 |
| 2.2.3.6 Tedlar | 16 |
| 2.2.3.7 PPMA..... | 16 |
| 2.2.3.8 Epoxidové pryskyřice | 17 |
| 2.3 Stárnutí izolantů..... | 18 |
| 2.3.1 Stárnutí vlivem vlhkosti vzduchu..... | 20 |
| 2.3.1.1 Vliv vysoké vlhkosti vzduchu..... | 20 |
| 2.3.1.2 Vliv nízké vlhkosti vzduchu | 20 |
| 2.3.2 Vliv elektrického pole | 21 |
| 2.3.3 Vliv prachu | 21 |
| 2.3.4 Vliv slunečního záření..... | 22 |
| 2.3.5 Vliv mechanické namáhání | 22 |
| 2.3.6 Stárnutí vlivem teplot | 23 |
| 2.3.6.1 Stárnutí vlivem vysokých teplot | 23 |
| 2.3.6.2 Stárnutí vlivem nízkých teplot | 26 |
| 2.3.7 Zákonitosti stárnutí..... | 26 |
| 2.4 Základní dielektrické vlastnosti izolačních materiálů | 28 |
| 2.4.1 Ztrátový činitel $\tan \delta$ | 29 |
| 2.4.1.1 Sériové zapojení..... | 30 |
| 2.4.1.2 Paralelní zapojení..... | 30 |
| 2.4.2 Elektrický odpor, elektrická vodivost | 31 |
| 2.4.3 Permittivita | 32 |
| 2.5 Řešení norem pro degrační testy | 34 |
| 2.5.1 Norma ČSN EN 61215..... | 35 |
| 2.5.1.1 Značení..... | 35 |
| 2.5.1.2 Zkoušení a kritéria přijetí..... | 36 |

| | |
|---|----|
| 2.5.1.3 Protokol o zkoušce | 36 |
| 2.5.1.4 Popis jednotlivých zkušebních postupů | 36 |
| 2.5.2 Norma ČSN EN 61345 | 39 |
| 3 Experimentální část | 40 |
| 3.1 Teoretická část měření | 40 |
| 3.1.1 Měření vnitřní rezistivity | 40 |
| 3.1.2 Měření povrchové rezistivity | 42 |
| 3.1.3 Výroba vzorků | 42 |
| 3.1.3.1 Laminátor | 42 |
| 3.1.3.2 Laminace vzorků EVA a TPU | 44 |
| 3.1.4 Vyhotovení vzorků Epox 1 a Epox 2 | 45 |
| 3.2 Úprava pece pro zrychlené stárnutí vzorků | 46 |
| 3.3 Popis pracoviště | 47 |
| 3.4 Průběh měření | 48 |
| 3.4.1 Popis jednotlivých kroků měření | 50 |
| 3.5 Výsledky měření | 51 |
| 3.5.1 Změna tloušťky vzorků | 51 |
| 3.5.2 Změna hmotnosti vzorků | 52 |
| 3.5.3 Opakované měření vzorků | 52 |
| 3.5.4 Měrný vnitřní a povrchový odpor | 53 |
| 3.5.5 Optické změny | 54 |
| 4 Závěr | 55 |
| 5 Použitá literatura | 57 |
| 6 Přílohy | 58 |
| 6.1 Příloha A | 58 |
| 6.2 Příloha B | 61 |
| 6.3 Příloha C | 65 |
| 6.4 Příloha D | 67 |
| 6.5 Příloha E | 69 |

1 Úvod

K přeměně slunečního záření na elektrickou energii využíváme fotovoltaického jevu. Jako nejlepší materiál se pro tuto přeměnu osvědčil křemík. K samotné přeměně tedy využíváme křemíkové fotovoltaické články. Tyto články samotné jsou velmi náchylné na vlivy okolního prostředí, proto je musíme pouzdrít a chránit jinými materiály. I v těchto materiálech dochází k určitým degradačním procesům.

Práce se zabývá principem funkčních vlastností materiálů pro pouzdrění solárních článků, zvláště degradačními vlivy na dielektrické materiály použité k ochraně křemíkových desek fotovoltaických panelů. Použité izolační materiály jsou při provozu vystaveny řadě vlivů, které mají přímý dopad na kvalitu a stabilitu jejich elektrických a mechanických vlastností. K nejvýraznějším faktorům ovlivňujících EIS patří mechanická, tepelná či elektrická namáhání a v neposlední řadě je nutno vzít také v úvahu namáhání vlivy okolního prostředí. Z tohoto důvodu byla vyvinuta řada diagnostických metod pro sledování stavu elektroizolačních systémů.

Pomocí měření dielektrických a optických vlastností pouzdrících materiálů můžeme stanovit předpokládanou životnost solárního panelu. Tyto zkoušky přesně definuje norma ČSN EN 61215 Fotovoltaické moduly z krystalického křemíku pro pozemní použití, která je v práci nastíněna s ohledem na autorská práva pro citaci norem.

1.1 Cíle

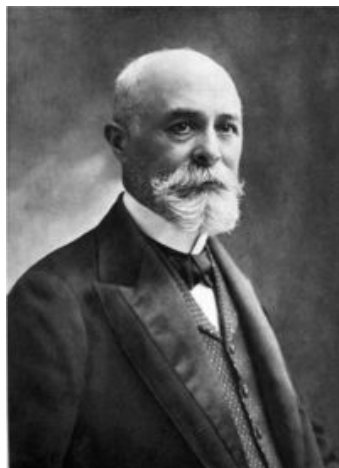
Cílem práce je rozšířit znalosti v oblasti fotovoltaických panelů a v nich používaných izolačních materiálů jako ochrana před nejrůznějšími vlivy prostředí. Dále vypracovat rešerši norem pro degradační testy. Konkrétní studovanou veličinou bude měrný vnitřní a povrchový odpor u materiálů TPU, EVA a epoxidové pryskyřice Epox 1 a Epox 2, při vystavení materiálů působením suchého tepla. Konečnou fází je stanovení předpokládané životnosti těchto vzorků.

2 Teoretická část

2.1 Historie vzniku fotovoltaiického článku

Pro začátek by bylo vhodné nastínit k jakým dějům ve fotovoltaiických článcích dochází, popsat jejich principy a objasnit čím se fotovoltaiika zabývá.

Jde o princip přeměny světla na elektrickou energii. Historie solárního článku se začala datovat rokem 1839, kdy francouzský experimentální fyzik Edmund Becquerel při pokusech s 2 kovovými elektrodami umístěnými v elektrovedivém roztoku zjistil, že při osvětlení zařízení vzrostlo na elektrodách napětí: fotovoltaiický efekt byl na světě. V roce 1877 byl objeven fotovoltaiický efekt na selenu (William Grylls Adams a Richard Evans Day) a vyroben první článek.



Obr.2.1 Edmund Becquerel (převzato z [1])

Důležitým krokem v historii byl objev způsobu růstu monokrystalu křemíku polským vědcem Czochralským v roce 1918. Přestože byl fotovoltaiický efekt postupně objeven i u jiných prvků (sulfid kadmia, oxid mědi), křemík se ukázal jako nejvýhodnější. Za vynálezce křemíkového solárního článku bývá označován Američan Russel S. Ohl (1941). Patent na “převaděč solární energie” dostali však 5. března 1954 Gerald L. Pearson, Daryl M. Chapin a Calvin S. Fuller, kteří o měsíc později předvedli křemíkové solární články s účinností 4,5 % a později 6 %.

Další vývoj solárních článků urychlilo rozhodnutí použít je jako zdroj energie pro družice Země. Účinnost článků postupně stoupá, v roce 1958 dosáhla 9 %. [1]

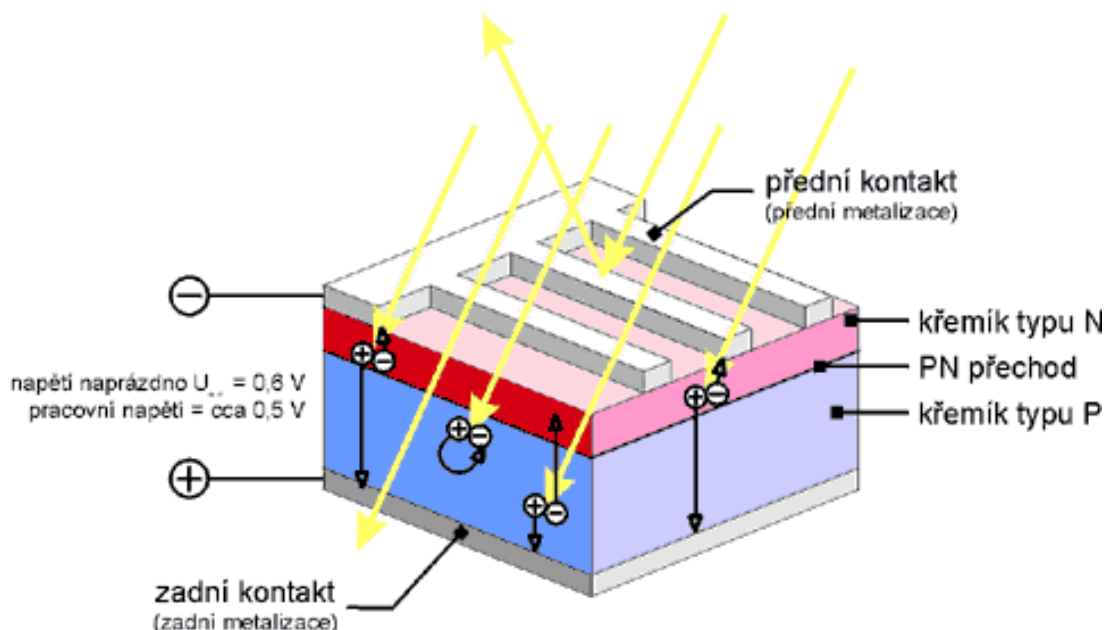
2.2 Fotovoltaický modul

2.2.1 Základní princip fotovoltaického jevu

Princip a funkce solárních (fotovoltaických) článků je založen na fotovoltaické technologii, která využívá fotoelektrický jev, také označovaný jako fotovoltaický efekt. Fotoelektrický jev v polovodičovém materiálu tedy produkuje elektrický proud působením dopadajícího záření. To se skládá z fotonů, která si lze vzdáleně představit jako letící balíčky energie. Tyto balíčky pak obsahují různá množství energie v závislosti na vlnové délce spektra záření. Když foton dopadne na fotovoltaický článek, může být odražen, projít skrz nebo být pohlcen, což způsobí uvolnění elektronu a ve výsledku vznik elektrického proudu.

Z pohledu struktury se solární článek podobá fotodiodě. Skládá se ze dvou vrstev krystalického křemíku (Obr. 2.2). Jedna vrstva křemíkového plátku je sycena (dotována) obvykle fosforem (polovodič typu N) a druhá strana je potištěna mřížkou stříbra (Ag) s příměsí hliníku (Al). Hliník v průběhu výrobního procesu pronikne do křemíkového plátku a vytvoří vrstvu P (polovodič typu P). Ve vrstvě N je přebytek elektronů a ve vrstvě P je jich nedostatek (díry). Tento rozdíl je způsoben právě dotací křemíkového krystalu dotujícími látkami. Mezi těmito vrstvami se vytvoří PN přechod, který zabraňuje přenosu elektronů z vrstvy N přímo do vrstvy P, tzv. potenciálová bariéra.

Dopadem světla (fotonů) do oblasti PN přechodu, se vlivem předávání energie světla atomům krystalické mřížky uvolňují elektrony, které díky potenciální bariéře tvořené přechodem PN nemohou přecházet do "kladné" vrstvy s vodivostí P a hromadí se ve vrstvě s vodivostí N. Stejně tak se v oblasti s P vodivostí hromadí díry. Nahromadění nosičů náboje vytváří elektrický potenciál (napětí) asi 0.6 V na jeden PN přechod, tzn. i solární článek. Po připojení elektrického obvodu na kontaktní plošky, začnou elektrony procházet vodičem z N vrstvy, kde jich přebytek, do vrstvy P. Vlastností PN přechodu je možnost snadnějšího přechodu volných elektronů z vrstvy P do vrstvy N, než obráceně z vrstvy N do vrstvy P. Celý obvod se tak uzavírá a obvodem teče proud jako z jiného zdroje napětí a proudu. Velikost generovaného proudu zde však závisí na ozáření článku.



Obr. 2.2 Princip přeměny světla na elektrickou energii

K dispozici je vždy jen tolik volných elektronů, kolik jich bylo uvolněno dopadajícím světlem (množstvím fotonů). Jednotlivé solární články se pak zapojují stejně jako baterie buď za sebou (sériově), aby bylo dosaženo potřebného napětí ($n \cdot 0,6 \text{ V}$), nebo vedle sebe (paralelně), aby se získal větší proud. Kombinací obojího lze vytvořit potřebný zdroj napětí a proudu. Možnost takové kombinace při zapojení se někdy označuje jako modularita solárních systémů. [1]

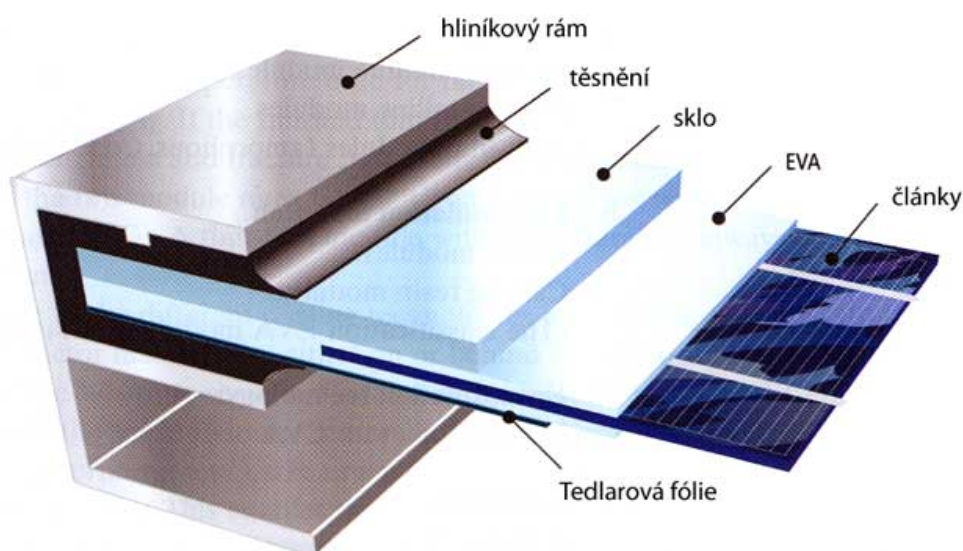
2.2.2 Zapouzdřování modulu

FV moduly jsou vytvořeny zapouzdřením sérioparalelně propojených solárních článků. Forma zapouzdření je zvolena dle zamýšleného použití a účelem zapouzdření je ochrana článků před mechanickým namáháním, vlivy počasí a vlhkostí. Pro zapouzdření, které zároveň články elektricky izoluje, se používají následující materiály:

- EVA fólie (ethylvinylacetát)
- PVB (Polyvinylbutyral)
- Pertex
- SentryGlas

- Teflon
- Tedlar
- Epoxidová pryskyřice

Způsob zapouzdření je podobný u krystalických i tenkovrstvých článků. Pro zadní kryt (podklad) FV modulů může být použito sklo či tenké vrstvy na bázi kovů nebo plastů, pro přední kryt se používá vysoce propustné a odolné tzv. „solární“ sklo či tenké transparentní ochranné vrstvy. Výjimkou je zapouzdření do Teflonu, které již nevyžaduje další přední ochrannou vrstvu. Běžnou součástí modulů je také ztužující rám uzpůsobený ke kotvení na podpůrnou konstrukci a kontakty pro připojení kabeláže. Pro ploché FV moduly se používá označení panely. [3]



Obr. 2.3 Skladba standardního FV panelu, který je součástí tepelně izolačního dvojskla (převzato z [3])

2.2.3 Vlastnosti pouzdrících materiálů

2.2.3.1 EVA (etylenvinylacetát) – Velmi často používaný materiál pro zapouzdření přední strany panelu. Jeho hlavním účelem je ochrana křemíkové desky před navlháním a slouží k elektrické izolaci. Díky elasticitě chrání článek proti mechanickým otřesům. Materiál se na požadované struktury nanáší jako folie, která se za teploty více než 80°C a

tlaku 100kPa po dobu asi 1hod laminuje. V tomto procesu dochází k zesíťování struktur a k vytvrzovacímu procesu.

Vlastnosti:

- elasticita
- přilnavost ke sklu
- vysoký vnitřní i povrchový odpor
- průhlednost
- snadná manipulace

Jeho nevýhodou je nedostatečná UV stabilita. Folie, která je vystavena dlouhodobému slunečnímu záření se zabarvuje dohněda. To má za následek snižování propustnosti slunečního záření a tím i snižování efektivnosti článku. Další nevýhodou je schopnost materiálu absorbovat vzdušnou vlhkost, což následně snižuje jeho požadované vlastnosti. Také její přilnavost na sklo a křemík není nejlepší. Může to vést až k tvoření vzduchových bublin, které se postupně zvětšují a postupně tak dochází k ničení článku. [4]

2.2.3.2 TPU (Termoplastický polyuretan) – Tento materiál se používá stejně jako EVA. Jde opět o folii, která se laminuje na sklo a křemík. Má však obecně lepší vlastnosti než EVA. Jeho přilnavost je značně vyšší, tudíž nedochází ke vzniku vzduchových bublin a materiály sklo a křemíková deska jsou k sobě připevněny mnohem silněji. Zvyšuje to spolehlivost a celkovou životnost solárního panelu. Při laminaci TPU nedochází k chemickému zesíťování a tudíž může být materiál znovu teplem měkčen a snadněji odstraňován z nalamínovaných ploch. To snižuje náklady na výrobu, kdy při jisté zmetkovosti můžeme drahý křemíkový článek opět použít. TPU je také opticky stálejší než EVA a nedochází u něj ke ztmavnutí struktury.

2.2.3.3 PVB (Polyvinylbutyral) – Tento materiál se již dlouho používal jako bezpečnostní sklo u předních skel automobilů. Jeho nevýhodou je vyšší citlivost na vodu, kdy dříve dochází k zatečení pod materiál. Dnes jsou však solární panely důkladně uzavřeny a k průsakům vody již nedochází. Výhodou je vyšší stabilita na UV záření a také vyšší adhezivní síla na sklo než u EVA.

2.2.3.4 Pertex – Jde o transparentní folii složenou z polyesteru (PES) a ethylenvinylacetátu (EVA). Její vlastnosti jsou podobné materiálu EVA, vyznačuje se větší odolností proti navlhání.

2.2.3.5 SentryGlas - Je trojná bariérová folie z PVB a polyesteru (PET) používaná pro přední stranu. SentryGlas je tvrdšího charakteru s malou ohebností. [6]

Vlastnosti:

- vysoká přilnavost ke sklu (iontové vazby)
- vysoká transparentnost
- asi 100x pevnější než PVB
- nedochází k delaminaci
- houževnatost

2.2.3.6 Tedlar (Polyvinylfluorid) - Materiál se používá pouze na zadní straně solárního panelu. Laminát je složen ze tří vrstev Polyvinylfluoridu (PVF) z nich jedna vrstva může být potisknuta. Tedlar má ideální odolnost vůči povětrnostním podmínkám a také minimální navlhání. Je velmi odolný vysokému rozsahu teplot. Před samotnou laminací se Tedlar pokrývá vrstvou tepelně aktivovaného lepidla.

2.2.3.7 PMMA (Polymethylmetakrylát) – jde o klasické plexisklo. Používá se jako nejsvrchnější krycí vrstva namísto Sentryglas v případech kdy požadujeme minimální váhu a pružnost solárního panelu. Materiál můžeme lepit jednosložkovými či dvousložkovými lepidly.

Vlastnosti:

- vysoká odolnost proti nárazu a vůči klimatickým podmínkám
- odolává působení mořské vody (alkalickým i anorganickým solím)
- vysoká propustnost světla
- pružnost popř. ohyb za studena
- velmi nízká hmotnost
- nekřehkost (při případném rozbití nevznikají ostré střepy)
- vysoká škála barevnosti

Nevýhodou je tepelná roztažnost materiálu, kterou musíme řešit vhodným upevněním. Nejlépe použitím pružného svorného uchycení pomocí gumového těsnění. Problémy nastávají také při udržování vysoké čistoty přední plochy. Materiál je oproti SentryGlas měkký a při otírání dochází k poškrábání vrchní vrstvy částicemi prachu. To snižuje průhlednost [10]

2.2.3.8 Epoxidové pryskyřice - Jsou to pryskyřice obsahující více než jednu epoxidovou skupinu v molekule. Nejběžněji obsahují glycidyllovou skupinu. Solární článek se pryskyřicí zalije a následně vytvrdí. Vytvrzování probíhá přidáním tvrdidla, přičemž vznikají makromolekulární látky mechanicky pevné, nerozpustné a netavitelné. Epoxidové skupiny jsou vysoce aktivní a můžeme pro vytvrzení použít široké spektrum tvrdidel podle účelu použití a technologie zpracování. Proto i vlastnosti u různých pryskyřic jsou lehce odlišné. Obecně je můžeme popsat takto.

Vlastnosti:

- výborná adheze ke kovům, keramice či sklu
- dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti
- mechanicky pevné, nerozpustné a netavitelné
- malá dilatace při vytvrzování
- při vytvrzování nedochází k prchavým zplodinám (netvoří samovolně bublinky)
- chemicky odolné
- průhledné
- minimální navlhavost

Odolnost proti teplu je u různých druhů odlišná, avšak pro použití v solárních panelech je více než dostatečná. K vyšší odolnosti proti UV záření se do pryskyřic přidávají různá plniva nebo látky schopny záření absorbovat. Bez těchto plniv dochází k fotochemické degradaci. Pryskyřice pak pórovatí a mění barvu, čímž se snižuje světelná propustnost.[8,9]

Technické údaje k některým z popisovaných materiálů

| Zkratka laminačního mat. | EVA | PVB | SG | Pertex |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Název materiálu | Etylenvinylacetát | Polyvinylbutyral | SentryGlas | Pertex |
| Materiál vzorku | Etylenvinylacetát kopolymer | Polyvinylbutyral termoplast | PVB a polyester (PES) | Polyethylen (PET) a EVA |
| Tloušťka fólie [mm] | 0,5 | 0,36 | 1,52 | 0,08 |
| Laminační teplota [°C] | 80 | 145 - 160 | 145 - 160 | 145 - 160 |
| Hustota [g.cm-3] | 0,96 | 1,105 | 0,95 | - |
| Spektrální propustnost [%] | 91 - 93 | 88 | 89 | 91 - 92 |

Tab. 2.1. Základní vlastnosti laminačních fólií [7]

2.3 Stárnutí izolantů

Stárnutí je definováno jako nevratné změny vlastností v důsledku působení jednoho nebo více ovlivňujících faktorů. Namáhání způsobující stárnutí může vyvolávat buď vnitřní nebo vnější stárnutí. Vnitřním stárnutím se rozumí nevratné změny základních vlastností výrobku vyvolané působením faktorů stárnutí. Vnější stárnutí je pak vliv nevratných změn vlastností vytvořených působením faktorů stárnutí na neúmyslně zavedené vady ve výrobku.

Změny vlastností izolantů, podmíněné stárnutím, mohou být buď vratné, nebo nevratné. Vratné (přechodné) změny jsou charakteru fyzikálního, např. vlhnutí aj., a izolant v těchto případech nabude opět původních vlastností, přestanou-li působit vlivy, které změnu vyvolaly (v tomto příkladu po vysušení vlhkosti). Nevratné změny jsou následkem složitých fyzikálně chemických pochodů, při nichž vznikají strukturální změny, provázené trvalým zhoršením mechanických, elektrických a jiných vlastností, které jsou vlastním projevem stárnutí izolace.

Činitelé, kteří způsobují změny vlastností organických izolantů, jsou zejména:

- teplota (zvláště nepravidelné teplotní cykly)
- vzdušný kyslík
- mechanické namáhání (hlavně otřesy a vibrace)
- elektrické pole (hlavně u vysokého napětí, kde je nebezpečí výbojů v dutinkách izolace)
- klimatické vlivy (hlavně vlhkost)
- chemické vlivy (různé agresivní látky)
- ultrafialové záření aj.

Naopak znaky nebo také projevy stárnutí izolace jsou:

- zhoršení elektrických vlastností
- snížení mechanické pevnosti
- změna struktury izolace, její zkřehnutí a praskání
- navlhnutí související se vznikem spár
- usazování prachu a sazí na povrchu izolace související se zdrsněním jejího povrchu

Procesy stárnutí izolace jsou podmíněny nejen vlastnostmi samotného materiálu, ale i podmínkami, ve kterých izolace pracuje, režimem zatěžování a také zvláštnostmi konstrukčního řešení elektrických zařízení. V technické praxi je stárnutí izolace vždy velmi složitý proces, při kterém jde o současné působení mnohých vnějších činitelů. Přesto však ve většině případů některý z těchto činitelů převládá a proto rozlišujeme hlavně tyto:

- tepelné stárnutí
- elektrické stárnutí
- mechanické stárnutí

Při tepelném stárnutí některých polymerů může docházet zpočátku ke zlepšování určitých vlastností (např. v důsledku dotvrzování) a teprve po překročení maxima dochází k jejich zhoršování. V praxi se proto pochody, vedoucí ke zlepšování vlastností, často označují jako zrání[2].

2.3.1 Stárnutí vlivem vlhkosti vzduchu

Vlhkost vzduchu a její účinky jsou vedle teploty vzduchu dalším z hlavních činitelů ovlivňujících bezporuchovou činnost elektrotechnických zařízení. Nejzávažnější problémy způsobuje vysoká vlhkost vzduchu.

2.3.1.1 Vliv vysoké vlhkosti vzduchu

Vysoká vlhkost ovlivňuje nepříznivě elektrické vlastnosti elektrotechnických výrobků, zvláště organických izolantů. Tento vliv bývá v některých případech bezprostřední (například vliv na povrchové vlastnosti izolantů), v ostatních případech je změna vlastností závislá na rychlosti pronikání vlhkosti do materiálů, jež probíhá ve většině případů procesem difúze. Voda pohlcená materiálem značně ovlivňuje jeho elektrické a mnohdy i mechanické vlastnosti. V úvahách o vlivu absorbované vlhkosti na permitivitu materiálu je nutno uvažovat molekulární konstanty vody, neboť voda je ve většině případů v materiálu v podstatě molekulárně rozložena. Nelze proto uvažovat makroskopickou hodnotu permitivity vody (80), kterou má kapalná voda, nýbrž hodnotu menší (cca 29). Naopak v případech, kdy je voda v součástce ve formě kapek nebo jako kapilární voda, je nutno použít hodnoty $\varepsilon = 80$.

Vlhkost snižuje izolační odpor izolantů, což souvisí s disociací molekul vody na ionty H^+ a OH^- . Tato disociace je důsledkem vysoké permitivity vody, přičemž stupeň disociace je exponenciálně závislý na permitivitě. Protože s růstem disociace roste i vodivost, klesá izolační odpor materiálu. Vliv vlhkosti se projevuje také zvýšením ztrátového činitele a snížení elektrické pevnosti izolantu. Vodní filmy absorbované na povrchu izolací a izolátoru způsobují povrchové zkraty.

Podstatné jsou dále fyzikálně-mechanické změny izolantů. Některé plasty bobtnají, jsou-li dlouho vystaveny vysoké vlhkosti. Vlivem kolísající relativní vlhkosti v přírodních podmínkách provlhlávají a bobtnají vnitřní a povrchové vrstvy materiálu různě. To způsobuje vznik malých trhlinek v povrchové vrstvě, jimiž vlhkost snadněji proniká do materiálu.

2.3.1.2 Vliv nízké vlhkosti vzduchu

Při nízké relativní vlhkosti vzduchu mohou izolanty vysychat, což je provázáno změnami objemu a deformacemi součástek a prvků vyrobených z těchto materiálů. Nízká

vlhkost vzduchu je pro elektrická zařízení obecně méně nebezpečný činitel než vysoká relativní vlhkost.

2.3.2 Vliv elektrického pole

Elektrickému namáhání je izolace vystavena po celou dobu provozu zařízení. Při klasifikaci vlivu elektrického namáhání na zařízení je nutno rozlišit vliv stejnosměrného a střídavého elektrického pole. Stejnosměrné elektrické pole nemá na provoz zařízení podstatný vliv, výjimku tvoří vysoké gradienty elektrického pole, které mohou vést k předprůrazovým stavům.

Elektrony a ionty dopadající na povrch organického izolantu způsobují jeho erozi, kterou se zmenšuje tloušťka izolační vrstvy. Úbytek materiálu v místě eroze je způsoben chemickou přeměnou makromolekulární látky na nízkomolekulární plynné nebo kapalné produkty při spolupůsobení oxidačních reakcí.

U fotovoltaických panelů, díky ne příliš vysokým napětím k degradaci vlivem elektrického pole takřka nedochází.[2]

2.3.3 Vliv prachu

Prach obsažený v ovzduší je možno podle původu rozdělit na:

- prach anorganický přírodní (písek, vulkanický prach, solné částice)
- anorganický průmyslový prach (vzniká při spalování např. cementový prach)
- organický prach (např. zárodky plísní, pyl, textilní prach).

V prostředí středně průmyslových oblastí mírného podnebí jsou množství anorganického přírodního prachu, anorganického průmyslového prachu a organického prachu přibližně v poměru 20 : 60 : 10. důsledku mikroskopických rozměrů se částice prachu neusazují pouze na povrchu součástí, nýbrž mohou pronikat velmi jemnými štěrbinami do uzavřených prostor.

Prach může vyvolat znehodnocení mechanického charakteru, ovlivňovat elektrické vlastnosti materiálů a prvků, zejména za přítomnosti vysoké vlhkosti vzduchu (např. povrchový odpor izolátorů). V podmínkách nízké vlhkosti může suchý prach způsobit vznik nebezpečných elektrostatických nábojů.

Největší vliv prachu u fotovoltaických panelů spočívá v jeho usazování na přední straně panelu a pohlcování slunečního záření (prach vytváří jemný stín).

2.3.4 Vliv slunečního záření

Vlivem infračervené části slunečního spektra přesahují povrchy předmětů často i o 40 °C teplotu vzduchu ve stínu, škodlivá je i jeho ultrafialová část. V důsledku těchto faktorů dochází k oxidaci, k vytváření nenasycených vazeb v polymerech nebo k rozpadu řetězců makromolekul. Tyto procesy mají vliv na elektrické i mechanické vlastnosti plastů, dochází k popraskání a křehnutí. Podobné účinky má záření s vysokou energií (záření gama, elektrony atd.). Iontové útvary vznikající přerušením vazeb makromolekul absorbovanou energií rekombinují za vzniku nových a často odlišných chemických vazeb, což má za následek změnu fyzikálních a chemických vlastností.

2.3.5 Vliv mechanického namáhání

U elektrotechnických zařízení může docházet k mechanickému namáhání z mnoha důvodů během výroby, dopravy, montáže a provozu. U některých typů zařízení bylo prokázáno, že mechanické namáhání během provozu, způsobené elektrodynamickými, elektromagnetickými a tepelnými silami, je jednou z hlavních příčin změn v jejich EIS.

Mechanické stárnutí zahrnuje:

- únavovou poruchu komponent izolace způsobenou velkým počtem cyklů namáhání o nízké úrovni
- termomechanické vlivy způsobené tepelnou dilatací a/nebo smrštěním
- zlomení izolace v důsledku vysokých úrovní mechanického namáhání, které může být způsobeno vnějšími silami nebo pracovními podmínkami zařízení
- abrazivní opotřebení způsobené relativním pohybem mezi součástmi zařízení
- tečení izolace v důsledku elektrického, tepelného nebo mechanického namáhání.

Tyto jevy mohou být lokalizovány a nerovnoměrně rozloženy v objemu izolace.[2]

2.3.6 Stárnutí vlivem teplot

2.3.6.1 Stárnutí vlivem vysokých teplot

Většina izolantů, hlavně izolanty organické, vykazují dlouhodobým působením vyšších teplot určité změny v chemické struktuře, které vznikají v důsledku pomalu probíhajících chemických procesů v materiálu. Mimo teplotu má na rychlost stárnutí při tepelném stárnutí vliv tlaku vzduchu, koncentrace kyslíku, přítomnost ozónu, který má silnější oxidační účinek než kyslík a také přítomnost různých chemických činitelů které mají vliv na urychlení či zpomalení stárnutí. Tepelné stárnutí se urychluje také působením ultrafialového záření. Všechny tyto okolnosti je třeba brát v úvahu i při laboratorních zkouškách urychleného tepelného stárnutí a je třeba je nechat působit přiměřeně podmínkám stárnutí v provozu.

Teplotní namáhání může mít charakter jak krátkodobého, tak dlouhodobého působení. Zatím co krátkodobé působení teploty má za následek obvykle vratné změny, dlouhodobé působení teploty zapříčiňuje vždy změny nevratné.

Při tepelném namáhání dochází v materiálech k různým chemickým reakcím jako jsou:

- a) **Zesít'ování makromolekul** – Probíhá procesem polymerace nebo polykondenzace a to pouze za předpokladu, že materiál obsahuje funkční skupiny, které umožní vznik trojrozměrných zesít'ovaných struktur. Zesít'ování materiálu doprovází jeho tvrdnutí a následně křehnutí. Podstatně se zhoršují jeho elektrické vlastnosti.
- b) **Depolymerace** – Je vlastně opakem polymerace. Dochází při ní k rozpadu řetězců makromolekul. Za pokojových teplot probíhá daleko pomaleji než oxidace, ale její důsledky jsou daleko citelnější při vyšších teplotách.
- c) **Oxidace** – probíhá u většiny materiálů vlivem vzdušného kyslíku. Její rychlost opět roste s teplotou materiálu. Projevuje se strukturálními změnami a vznikem polárních zplodin, které mají za následek zvýšení vodivosti a ztrátového činitele. U organických látek dochází vlivem oxidace k trhání makromolekul a tím klesá pevnost látky a většinou s i zhoršují elektrické vlastnosti.

Jmenované reakce probíhají za všech teplot, přičemž s rostoucí teplotou se jejich vliv více či méně zvyšuje.

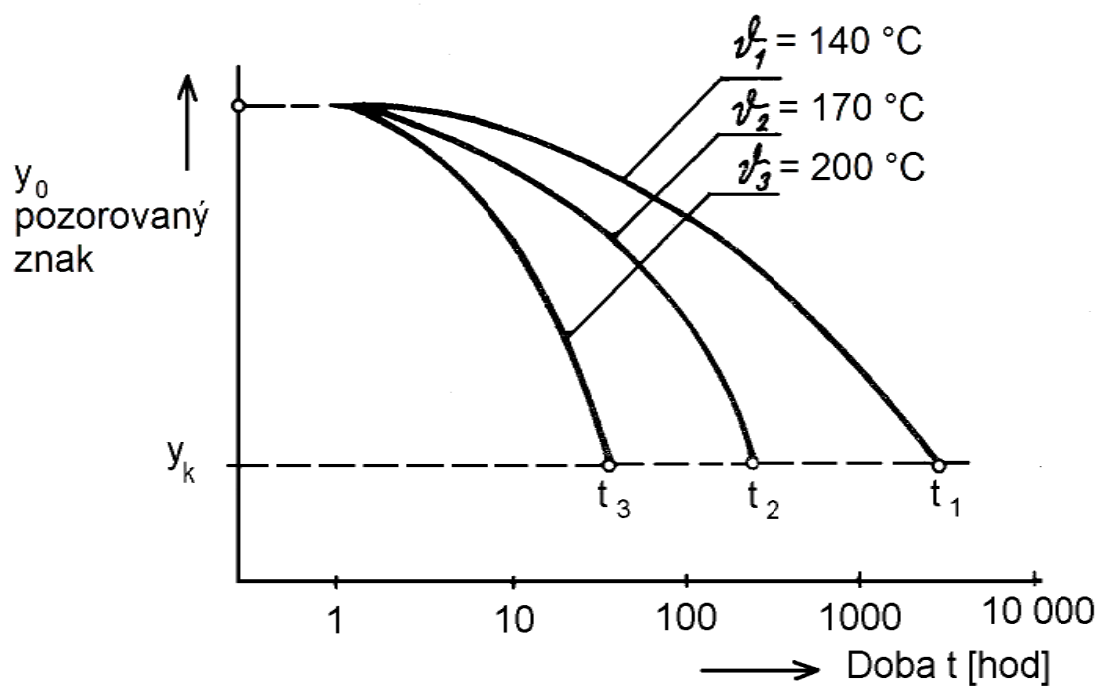
Při laboratorních zkouškách urychleného tepelného stárnutí se vzorky materiálů vystavují dlouhodobému působení teplot přiměřeně vyšších, než jsou podmínky v provozu. Aby bylo možné posoudit, kdy materiál vlivem teplotního namáhání zestárnul je nutné nejdříve zvolit fyzikální veličinu, která se vlivem stárnutí mění (pozorovaný znak). Dále je nutné vybrat kritérium zestárnutí, což je krajní velikost pozorovaného znaku, při jejímž dosažení je materiál již zcela nepoužitelný. Zpravidla to bývají hodnoty elektrických a mechanických vlastností těchto materiálů a podle změn vlastností se vyhodnocuje rychlost stárnutí materiálů. Podle rychlosti stárnutí (zkouší se nejméně při třech různých vhodně zvolených teplotách) můžeme určit teplotu, která je maximálně přípustná, aby se izolant v provozu nepoškodil a podstatně se nezhoršily jeho vlastnosti za průměrnou dobu, např. 20 let. Takto určená teplota je dlouhodobou teplotní odolností materiálů. Podle ní rozdělujeme izolanty do tepelných tříd. Rozdělení izolantů do tepelných tříd podle tepelné odolnosti zavedla organizace IEC. U nás jsou uvedeny v normě ČSN 34 0270.[5]

Výsledky teplotního zatěžování materiálu vykresluje do 2 grafů a jejich křivky označujeme za:

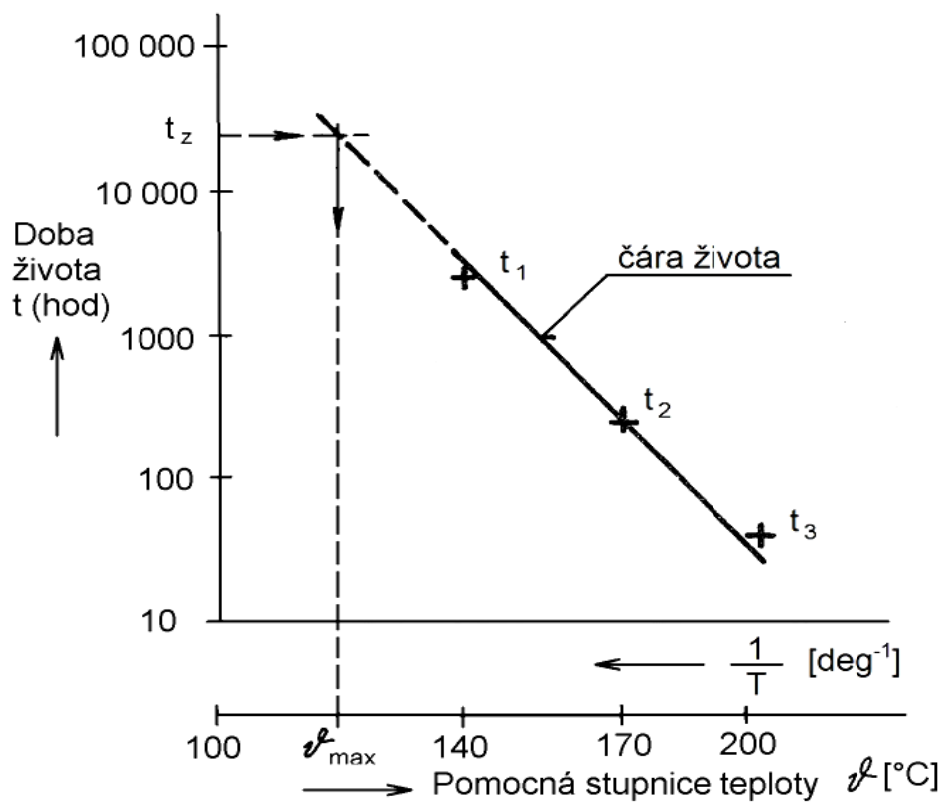
- a) **Čáry stárnutí $y = f(t)$** , grafické znázornění průběhu hodnot pozorovaného znaku (y) v závislosti na čase při stálé teplotě jako parametru, a to od výchozí (změřené) hodnoty y_0 až po zvolené kritérium zestárnutí y_k , jak je schematicky znázorněno na obrázku 2.3
- b) **Čára života $y = f(\nu)$** , grafické znázornění doby života v závislosti na teplotě pro zvolené kritérium zestárnutí y_k (obr. 2.4). Získáme, jestliže hodnoty vsadíme do vztahu:

$$\log t = f\left(\frac{1}{\theta}\right) \quad (2.1)$$

Extrapolace čáry života do provozních teplot nám poskytne zjistit očekávanou dobu technického života izolačního systému. Nebo naopak můžeme pro požadovanou dobu života zjistit mezní teplotu, kterou by měl izolační systém bez porušení spolehlivě snášet. Na ose x je vynesena stupnice reciproké absolutní teploty [8].



Obr. 2.3 Čáry stárnutí



Obr. 2.4 Čára života

2.3.6.2 Stárnutí vlivem nízkých teplot

Působení nízkých teplot na materiály lze charakterizovat následovně:

- a) **Přímý účinek teploty na materiály** – Dělí se na změny vratné a nevratné. Vratné jsou spojeny s rozměrovými, mechanickými a elektrickými změnami. Nevratné změny zahrnují vznik trhlin a krystalizaci.
- b) **Sekundární účinek nízké teploty** – projevuje se zvláště pokud se kolem podchlazeného materiálu náhle oteplí. Dochází ke kondenzaci par a vlhnutí.

2.3.7 Zákonitosti stárnutí

Klasický pokus o kvantitativní vyjádření tepelného stárnutí a matematickou formulaci jeho časového průběhu vykonal V. M. Montsinger (r. 1930), který systematicky vyšetřoval dobu života (t) papírové izolace vodičů v oleji.

$$t = A \cdot e^{-m\vartheta} \quad (2.2)$$

kde t - doba života izolace [hod. nebo roky]

m, A - materiálové konstanty, přičemž A má význam fiktivní doby života

t_0 při teplotě $\vartheta = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

ϑ - konstantní teplota stárnutí [$^{\circ}\text{C}$]

Ze vztahu jde určit, že pokud snížíme teplotu $\Delta\vartheta = 8\text{ }^{\circ}\text{C}$, pak se doba života zdvojnásobí na $2t$. Jde o tzv. Montsingerovo $8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nemá však obecnou platnost, neboť platí jen pro papír v oleji a pro úzký rozsah teplot, v němž bylo vyšetřeno. Pozdější práce jiných autorů vedly k obecnější zákonitosti stárnutí.

Rovnice (2.2) byla určena empiricky, aniž byla (i její konstanty m, A) podložena teoretickým rozbořem, avšak dala směr pro další vývoj teorie stárnutí organických izolantů. Ukázala nápadnou podobnost s obecným vztahem mezi reakční kinetikou a teplotou, který je vyjádřen klasickou rovnicí Arrheniovou (2.3). Látky k uskutečnění chemické reakce musejí překonat energetickou bariéru. Nemají-li k tomu dost energie, k reakci nedojde. Překročení energetické bariéry dosáhneme nejlépe zvýšením energie

výchozích látek, nejčastěji zvýšením teploty. Pro závislost rychlostní konstanty na teplotě platí[8]

Arrheniova rovnice:

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = -E^* \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.3)$$

kde k_2 - rychlostní konstanta při teplotě T_2

k_1 - rychlostní konstanta při teplotě T_1

E^* -je aktivační energie dané reakce

To poukazuje na to, že při znehodnocování organických látek stárnutím jde o chemické pochody, které v principu podléhají stejným zákonitostem jako všechny ostatní chemické přeměny. V souladu s poznatky z teorie chemické kinetiky pak dospějeme k obecnější formulaci závislosti doby života na teplotě tímto postupem:

Rychlost chemické reakce závisí na koncentraci c reagujících složek a na teplotě. V průběhu reakce se koncentrace mění, přičemž rychlost této změny je dána vztahem (2.4).

$$\frac{dc}{dt} = -k \cdot c^n \quad (2.4)$$

U většiny organických izolantů lze reakce považovat za monomolekulární či pseudomonomolekulární, pro něž $n = 1$ (reakce prvního řádu).

Koncentrace c reagující látky klesne na polovinu své výchozí hodnoty za dobu poločasu danou vztahem (2.5).

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (2.5)$$

Rychlostní konstanta k závisí na absolutní teplotě podle Arrheniovy rovnice (2.6),

$$k = K \cdot e^{-\frac{W}{RT}} \quad (2.6)$$

kde K - tzv. frekvenční činitel, úměrný celkovému počtu vzájemných srážek reagujících molekul látky za jednotku času

W - aktivační energie, která je potřeba k reakci molekul

R - je plynová konstanta

T - absolutní teplota

Konstantní veličiny W a R se obvykle slučují, tedy $\frac{W}{R} = B$

V teorii stárnutí, která vychází z kinetiky chemických reakcí, se předpokládá přímá souvislost změn chemické výstavby izolačních materiálů působením teploty se zhoršováním jejich fyzikálních vlastností. Rychlost chemické reakce tak je rychlostí stárnutí. Potom reciproká hodnota je úměrná době, za kterou v izolantu proběhly přeměny způsobující jeho znehodnocení.

Tímto postupem dospěl W. Büssinger (r. 1942) teoreticky k formulaci životnostního zákona ve tvaru (2.7),

$$t = B \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (2.7)$$

kde t - doba života izolace (hodin nebo roků)

b, B - materiálové konstanty

T - absolutní teplota

2.4. Základní dielektrické vlastnosti izolačních materiálů

Mezi základní dielektrické vlastnosti elektroizolačních materiálů z hlediska elektrického namáhání patří měrný elektrický odpor, permitivita a ztrátový činitel.

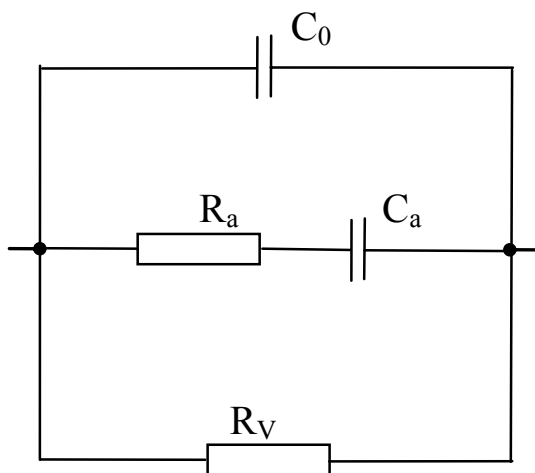
2.4.1 Ztrátový činitel $\tan \delta$

Dielektrické ztráty jsou proces přeměny části elektrické energie na teplo v případě, že se izolační materiál nachází v elektrickém poli. Kromě procesu dielektrického ohřevu je tato přeměna nežádoucí a energie přeměněná na teplo je energií ztrátovou. Množství energie, které se přemění na teplo za jednotku času (výkon) v jednotce objemu (v m^3) nazýváme měrnými dielektrickými ztrátami.

Veličinou, která tento jev popisuje je ztrátový činitel $\tan \delta$, který je dán poměrem ztrátového proudu k proudu čistě kapacitnímu (jalovému). Čím větší je výsledné číslo, tím větší je výkon přeměněný na teplo a tím větší je současně teplota dielektrika, s čímž souvisí proces tepelného stárnutí případně i nebezpečí tepelné destrukce izolantu. Z tohoto důvodu je snaha dielektrické ztráty minimalizovat, a současně zajistit dostatečné chlazení izolantu.

Mezi kvalitní izolanty je možné řadit materiály se ztrátovým činitelem $\tan \delta$ nižším než 10^{-3} . Tento ukazatel s degradací materiálu postupně vzrůstá.

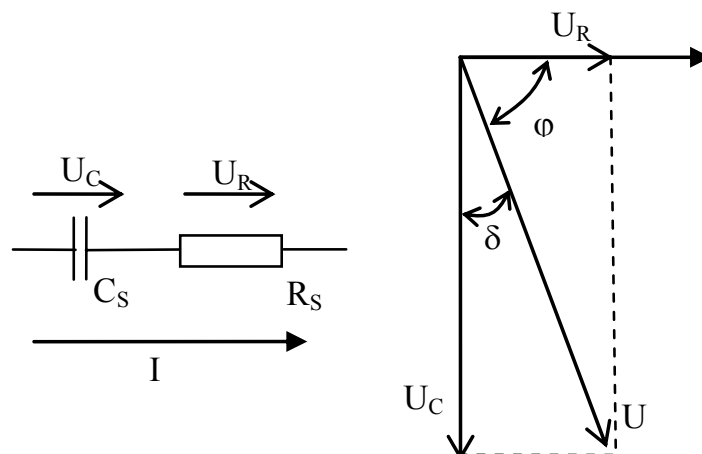
Ztrátové dielektrikum lze pro účely výpočtu ztrátového výkonu P_z nebo $\tan \delta$ nahradit ekvivalentním zapojením bezztrátových prvků a prvků, charakterizujících ztráty. Na volbě náhrady teoreticky nezáleží. Požadavkem však je, aby činný výkon a fázový úhel ztrátové soustavy byl ekvivalentní ztrátovému výkonu a fázovému úhlu ztrátového dielektrika [5].



Obr. 2.5 Zjednodušené náhradní schéma kondenzátoru s technickým dielektrikem

Pro účely měření se náhradní schéma (obr. 2.5) dále zjednodušuje. Používá se buď sériové (obr. 2.6), nebo paralelní schéma (obr. 2.7), skládající se pouze ze dvou ideálních prvků.[12]

2.4.1.1 Sériové zapojení



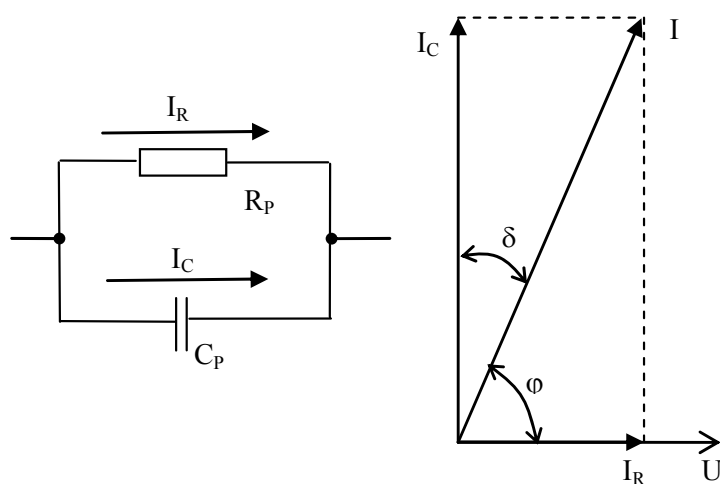
Obr. 2.6 Sériový náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem

Pro sériové zapojení platí vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_R}{U_C} = \omega \cdot R_S \cdot C_S \quad (2.8)$$

$$P_Z = IU_R = U^2 \cdot \omega \cdot C_S \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (2.9)$$

2.4.1.2 Paralelní zapojení:



Obr. 2.7 Paralelní náhradní obvod kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem

Pro sériové zapojení platí vztahy:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega \cdot R_p \cdot C_p} \quad (2.10)$$

$$P_z = U^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (2.11)$$

Jelikož hodnota ztrátového výkonu musí být pro obě zapojení ekvivalentní, musíme porovnat rovnici (2.8) s (2.9) a (2.10) s (2.11). Dojdeme ke vztahům:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \doteq C_s \quad (2.12)$$

$$R_p = R_s \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}{\operatorname{tg}^2 \delta} \doteq \frac{R_s}{\operatorname{tg}^2 \delta} \quad (2.13)$$

2.4.2 Elektrický odpor, elektrická vodivost

Jestliže je materiál vložen v elektrickém poli a mohou se v něm volně pohybovat elektrické náboje, mluvíme o elektrické vodivosti prostředí. Vodivost je pak určena počtem volných elektrických nábojů n v jednotce objemu a jejich pohyblivostí μ a náboji q

$$\gamma_s = nq\mu \quad (2.14)$$

Při studiu elektroizolačních materiálů se uvažuje pouze vodivost iontového charakteru. Pohyblivost nábojů μ je dána jejich rychlostí v při jednotkové intenzitě elektrického pole E :

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (2.15)$$

Po vložení dielektrika mezi desky kondenzátoru a připojení stejnosměrného napětí začne procházet dielektrikem elektrický proud, jehož hodnota postupně klesá. Tento jev je

způsoben faktem, že částice nejsou zcela volné, a proto se postupně přestávají pohybovat. Po dostatečně dlouhé době proud dosáhne ustálené hodnoty. Analogicky k hodnotě ustáleného proudu lze mluvit o hodnotě ustálené vodivosti γ_S :

$$\gamma_S = \frac{i_S}{E} \quad (2.16)$$

Převrácenou hodnotou ustálené vodivosti je vnitřní odpor. Měrný vnitřní odpor (rezistivita) ρ_v je vnitřní odpor vztažený ke vzorku materiálu o objemu 1 m^3 , přičemž proud bude procházet dvěma protilehlými stěnami této krychle. Měrným povrchovým odporem ρ_s se nazývá hodnota odporu, kterou naměříme, prochází-li proud protilehlými hranami čtvercové plochy o velikosti 1 m^2 .

2.4.3 Permittivita

Permittivita ε je jednou ze základních vlastností dielektrických materiálů. Podle Gaussovy věty elektrostatiky je tok vektoru dielektrického posuvu uzavřenou plochou S roven celkovému náboji Q uzavřenému uvnitř plochy:

$$\iint_S D dS = \sum_{i=1}^n Q \quad (2.17)$$

Elektrický izolant je látka s malou elektrickou vodivostí a velkou elektrickou pevností. Každý izolant je současně i dielektrikem, tedy soustavou skládajících se ze stejného počtu navzájem vázaných kladných a záporných elektrických nábojů. Navenek je dielektrikum elektricky neutrální, ale v elektrickém poli dochází k polarizaci, tj. ke vzájemnému posuvu kladných nábojů ve směru el. pole a záporných nábojů v opačném směru. Protože se permitivita používá téměř výhradně ve formě relativní, zapisuje se tato rovnice ve tvaru

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (2.18)$$

- kde
- ϵ_0 je (absolutní) permitivita vakua ($\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$)
 - ϵ_r je relativní permitivita.

Zvýšení elektrické indukce \vec{D} v důsledku polarizace se při konstantní intenzitě \vec{E} projeví zvětšením náboje na elektrodách příslušného měřicího kondenzátoru. Tohoto jevu se užívá při praktickém určování relativní permitivity, kdy se měření elektrické indukce, resp. náboje, převádí na měření kapacity. Vztah pro relativní permitivitu je:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (2.19)$$

- kde
- C_x je kapacita měřicího kondenzátoru s vloženým dielektrikem
 - C_0 kapacita geometricky shodného měřicího systému

Relativní permitivita ϵ_r bezprostředně souvisí s atomovou strukturou látky, a je tudíž materiálovou veličinou. Pro vakuum je $\epsilon_r = 1$, u všech ostatních látek je $\epsilon_r > 1$. Permitivita je makroskopickou veličinou. Jednou ze základních úloh fyziky dielektrik je hledání souvislosti mezi hodnotou ϵ_r a atomovou strukturou dielektrika.[11]

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.20)$$

K popisu dielektrických ztrát a polarizací je zavedena komplexní permitivita obecně definovaná jako poměr elektrické indukce v permitivním prostředí k elektrické indukci ve vakuu. Reální část komplexní permitivity charakterizuje velikost polarizace v dielektriku. Imaginární část má charakter ztrátového čísla, které zahrnuje dielektrické ztráty způsobené relaxačními polarizacemi a elektrickou vodivostí. Komplexní permitivita není konstantou, ale je funkcí teploty dielektrika a kmitočtu působícího elektrického pole, případně jiných činitelů.

Polarizace v dielektriku dělíme na:

- Rychlé (pružné elastické) - nevznikají ztráty v dielektriku
- Pomalé (relaxační) - projevují se ohříváním dielektrika a tím vznikají ztráty

2.5 Rešerše norem pro degrační testy

Technické normy jsou dokumentované dohody, které pro všeobecné a opakované použití poskytují pravidla, směrnice, pokyny nebo charakteristiky činností nebo jejich výsledků, které zajišťují, aby materiály, výrobky, postupy a služby vyhovovaly danému účelu. Můžeme je charakterizovat takto:

- Jsou vyjádřením požadavků na to, aby výrobek, proces nebo služba byly za specifických podmínek vhodné pro daný účel.
- Stanoví základní požadavky na kvalitu a bezpečnost, slučitelnost, zaměnitelnost, ochranu zdraví a životního prostředí.
- Usnadňují volný pohyb zboží v mezinárodním obchodu, snaží se, aby výroba byla racionální, aby se ochrana životního prostředí a konkurenceschopnost vzájemně podporovaly, a aby byli spotřebitelé na vnitřním trhu dostatečně chráněni.
- V současné době je technická norma kvalifikované doporučení, není závazná. Její používání je dobrovolné, avšak všestranně výhodné.
- Norma je veřejně dostupný dokument, to znamená, že je přístupná ve všech fázích vzniku a používání v praxi.
- Je to dokument založený na souhlasu všech zúčastněných stran se zásadními otázkami řešení. Tím se norma liší od právních předpisů, které mohou vznikat bez projednání a souhlasu všech, jichž se týkají.

Druhy norem se liší podle obsahu, který je určující pro účel jejich použití (terminologické, základní, zkušební, normy výrobků, bezpečnostní předpisy, normy postupů/služeb, řízení jakosti, rozhraní, zaměnitelnosti).

Česká technická norma - Každá původní česká technická norma, která se může vytvářet pouze v oblastech, ve kterých neexistují normy evropské nebo mezinárodní. Má značku ČSN (např. ČSN 73 4301). Tvoří pouze cca 10% z celkové roční produkce technických norem v České republice.

Evropské či mezinárodní normy (označené např. EN, ETSI, ISO, IEC), které jsou přejaty do soustavy českých norem se stávají normami českými. Označení tvoří značka české technické normy a značka přejímané normy (nebo přejímaných norem)-např. ČSN EN, ČSN ISO, ČSN EN ISO, ČSN IEC, ČSN ETS (např. ČSN EN 115, ČSN ISO 1735 , ČSN EN ISO 9001, ČSN IEC 61713, ČSN ETS 300 976). Tvoří cca 90 % z celkové roční produkce technických norem.

Současně s jejich převzetím do národní soustavy norem se ruší překonané či konfliktní původní české technické normy.[13]

2.5.1 Norma ČSN EN 61215

Plné znění normy je ČSN EN 61215 Fotovoltaické moduly z krystalického křemíku pro pozemní použití - posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu.

Tato mezinárodní norma posuzuje požadavky způsobilosti konstrukce pozemních fotovoltaických modulů vhodných pro dlouhodobý provoz v mírných klimatických podmínkách. Platí pouze pro typy vyrobené na bázi krystalického křemíku a neplatí pro moduly používané s koncentrátory.

Účelem zkoušky je zjistit elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti modulu. Na jejich podkladě pak ukázat, že modul je schopen vydržet prodlouženou expozici v mírném klimatu.

Pro testování se z výrobní dávky vybere náhodně osm modulů a požadované náhradní. Moduly musí být podrobeny obvyklé výstupní výrobní kontrole. Jsou-li zkoušené moduly prototypy nové konstrukce a nejsou vzaty z výroby, musí být tato skutečnost uvedena ve zkušební protokolu [14].

2.5.1.1 Značení

Každý modul musí mít tato zřetelná a nesmazatelná označení:

- název, zkratku nebo znak výrobce,

- číslo typu nebo modulu a sériové číslo,
- maximální napětí systému, pro něj je modul vhodný a polaritu vývodů.

2.5.1.2 Zkoušení a kritéria přijetí

Navržený modul bude považován za vyhovující a získá i typové schválení IEC, pokud všechny zkušební vzorky splní tyto kritéria:

- Pokles maximálního výstupního výkonu při normalizovaných podmínkách nepřekročil předepsanou mez, tj. 8 % po každém sledu zkoušek
- Žádný ze vzorku nevykázal poruchu obvodu nebo uzemnění
- Není viditelná žádná pozorovatelná vada
- Jsou splněny požadavky izolace

Jestliže dva nebo více z modulů nevyhoví těmto kritériím, konstrukce se pokládá za nevyhovující[14].

2.5.1.3 Protokol o zkoušce

Po úspěšném ukončení sledu zkoušek musí zkušebna podle jednacího řádu IECQ, vyhotovit potvrzený protokol o kvalitativních zkouškách. V tomto protokolu uvede naměřené provozní charakteristiky a podrobnosti o všech poruchách a opakovaných zkouškách. Výrobce si ponechá kopii tohoto dokumentu.

Jakékoliv změny konstrukce, materiálu, součástek nebo výrobních postupů si vyžadují opakování některých nebo všech kvalifikačních zkoušek.

2.5.1.4 Popis jednotlivých zkušebních postupů

1. Vizuální kontrola - účelem je odhalení viditelných závad. Provádí se při osvětlení 1000 lux a sleduje se výskyt abnormalit.
2. Výkon při normalizovaných zkušebních podmínkách (NZIP) - Určuje jak se mění výkon v závislosti na zátěži při NZIP. Měří se voltampérová charakteristika při okolní teplotě $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ a při intenzitě záření 1000 W.m^{-2} . Pro osvětlení se používá přirozeného slunečního světla nebo simulátor třídy A.
3. Zkouška izolace se provádí při teplotě okolní atmosféry a při relativní vlhkosti vzduchu menší než 75 %. Zkratované výstupní svorky se připojí na kladný vývod

stejnoseměrného zdroje a neizolované kovové části modulu se připojí k zápornému pólu. Testovací napětí se pozvolna zvyšuje na hodnotu 1000 V plus dvojnásobek maximálního napětí systému naprázdno. Modul je namáhán hodnotou maximálního napětí po dobu 1 minuty. Poté je testovací napětí odpojeno a modul se nechá po dobu 5 minut relaxovat. V dalším kroku se opět připojí zdroj napětí o hodnotě 500 V a při této hodnotě se měří izolační odpor.

4. Měření teplotních součinitelů - testovaný modul se uzavře do teplotní komory s průhledným okénkem a na vhodné místo je připojen prostředek pro měření povrchu teploty modulu. Na modul pak dopadá záření z impulsního slunečního simulátoru. Komora se ohřeje na maximální požadovanou teplotu (85°C) a nechá se zvolna chladnout. V intervalu 5 °C se pak měří proud nakrátko I_{sc} a napětí naprázdno U_{oc} , v rozmezí minimálně 30 °C. Hodnoty I_{sc} a U_{oc} se vynesou do grafu jako závislost na teplotě. Metodou nejmenších čtverců se sestojí konečné křivky a z nich pak teplotní součinitel proudu (α) a teplotní součinitel napětí (β).
5. Měření jmenovité provozní teploty článku (NOCT) - Jmenovitá provozní teplota je definována jako střední teplota PN přechodu solárního článku v modulu upevněném na otevřené konstrukci v normalizovaném prostředí. Jmenovitá provozní teplota článku určuje, při jaké teplotě bude pracovat modul v terénu. Pro měření jsou stanoveny dvě metody, první je primární metoda a druhou metoda referenční desky.
6. Výkon při jmenovité provozní teplotě článku - účelem této zkoušky je určit jmenovitý výkon modulu do zátěže při jeho provozní teplotě.
7. Výkon při nízké intenzitě ozařování - zjišťuje se voltampérová charakteristika modulu při teplotě okolí 25°C a intenzitě ozařování 200 W.m⁻² s použitím simulátoru třídy A nebo slunečního světla v kombinaci s vhodným neutrálním filtrem.
8. Zkouška vystavení vnějším vlivům - tato zkouška by měla simulovat dlouhodobé vystavení modulu slunečnímu světlu. Výsledky, vzhledem ke krátkosti zkoušky, je nutné považovat za orientační a vhodné pro identifikaci možných problémů.
9. Zkouška odolnosti proti místnímu přehřátí - zjišťuje se schopnost modulu odolávat vlivům místního přehřátí, které vzniká prasklými, zastíněnými,

znečištěnými nebo nesprávně zapojenými články v modulu. Následky přehřátí některého z článků mohou být destruktivní pro daný článek (roztékání pájky) nebo pro celý modul (odchlípnutí laminovací fólie).

10. Zkoušky tepelnými cykly - testované moduly se umístí do klimatické komory a k jejich svorkám se připojí přístroje pro měření izolačního odporu. Rozsah teplot je od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$, vzduch musí v komoře cirkulovat rychlostí nejméně 2m.s^{-1} . Rychlost změny teplot by neměla překročit $100^{\circ}\text{C.h}^{-1}$. Každá z mezních hodnot musí na moduly působit minimálně 10 minut, ale celková doba cyklu nesmí přesáhnout 6 hodin.
11. Zkouška mrznoucí vlhkostí - účel této zkoušky je testovat schopnost modulu odolat působení teploty v kombinaci s vlhkostí. Existují dvě alternativní metody: jednokomorová a dvoukomorová. Dvoukomorová se používá v případě, že není k dispozici komora umožňující rozsah teplot od -40°C do 85°C .
12. Zkoušky vlhkým teplem - tato zkouška je podobná jako zkouška mrznoucí vlhkostí, s tím rozdílem, že v modulu se v klimatické komoře ohřejí na konstantní teplotu 85°C při vlhkosti 85 %. Doba působení je nejméně 200 hodin.
13. Zkouška pevnosti vývodů - zkouškám se musí podrobit všechny vývody. Tahová síla nesmí překročit sílu danou součinem gravitačního zrychlení a váhy modulu. Při zkoušce ohnutím se 1 až 10 krát ohýbají všechny vývody v každém z opačných směrů.
14. Zkouška krutem - účelem této zkoušky je odhalit závady, které by mohly vzniknout upevněním na nedokonale rovný povrch. Modul se testuje při deformačním úhlu $1,2^{\circ}$. Dosáhne se tak, že tři z rohů se přichytí v rovině a čtvrtý roh se z této roviny vychýlí o vzdálenost přesně definovaný normou.
15. Zkouška mechanickým zatížením - tato zkouška simuluje statické zatížení sněhem, ledem a odolnost modulu proti nárazovému větru. Modul se připevní na nosnou konstrukci pouze v rozích tak, aby vzdálenost mezi body připevnění byla co největší. Pomocí vaku naplněného vodou je panel ze přední i zadní strany vystaven tlaku 2400 Pa což odpovídá rychlosti větru 130 km.h^{-1} nebo tlaku až 5400 Pa. Doba působení je 1 hodina.

16. Zkouška krupobitím - proti fotovoltaickému panelu, který má teplotu místnosti, jsou vrhány ledové koule o průměru 12,5mm až 75mm, rychlostmi od 16m.s^{-1} do 40 m.s^{-1} . Koule jsou vrhány na přesně určená místa na panelu a po každém dopadu se dané místo podrobí vizuální kontrole.

2.5.2 Norma ČSN EN 61345

Zkouška ultrafialovým zářením (UV) pro fotovoltaické moduly se nenachází v přeloženém tvaru. Podle podnikových informací se moduly testují v rozsahu vlnových délek 280 až 400 nm při intenzitě záření 100 W.m^{-2} s tolerancí $\pm 10\%$ ze vzdálenosti 1m.

[15]

3. Experimentální část

V této části se budeme prakticky zabývat měřením vnitřního a povrchového odporu a jejich změnami v závislosti na tepelném stárnutí dielektrik. Časy stárnutí pro měření byly zvoleny (0, 10, 26, 51, 94, 174, 314 a 500)hod při teplotě 80°C. Měření probíhalo na čtyřech druzích materiálů, které se v praxi používají jako ochranné vrstvy fotovoltaických panelů. Tyto materiály jsou TPU, EVA, Epox1 a Epox2. Pod materiály s označením Epox1 a Epox 2 se skrývají dva druhy epoxidových pryskyřic. Měření probíhalo ve spolupráci s firmou Solartec a.s., která zajišťovala měřené materiály a technickou podporu pro laminaci vzorků a nepřála si, aby byly zveřejňovány obchodní názvy těchto materiálů. Materiály se po dlouhodobých zkušenostech používají při sestavování různých druhů fotovoltaických panelů.

3.1 Teoretická část měření

Měření rezistivity dielektrických materiálu je popsáno v kapitole 2.4.2. Přímě se budeme zabývat měřením vnitřního a povrchového odporu.

Na velikost vnitřního a povrchového odporu nemá vliv jen vnitřní struktura materiálů, která se mění tepelnou degradací, ale také navlhání materiálů a jejich povrchová čistota. Obě tyto nežádoucí složky se podílí významně na velikosti odporů. Proto se snažíme, aby velikost těchto složek v průběhu času byla konstantní.

3.1.1 Měření vnitřní rezistivity

Vnitřní rezistivita materiálu se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty uvnitř vzorku. Číselně se rovná vnitřnímu odporu krychle ze zkoušeného materiálu o hraně 1m, měřenému mezi dvěma elektrodami, přiloženými na protilehlých stěnách. [9]

Měření vnitřní rezistivity se převádí na měření vnitřního odporu R_v , který se počítá z proudu procházejícího vnitřkem izolantu mezi měřicí a napětovou elektrodou a z přiloženého napětí. Odpor lze také měřit přímo megaohmmetrem. ρ_v se pak počítá z rozměrů vzorku (elektrodového systému) a odporu R_v :

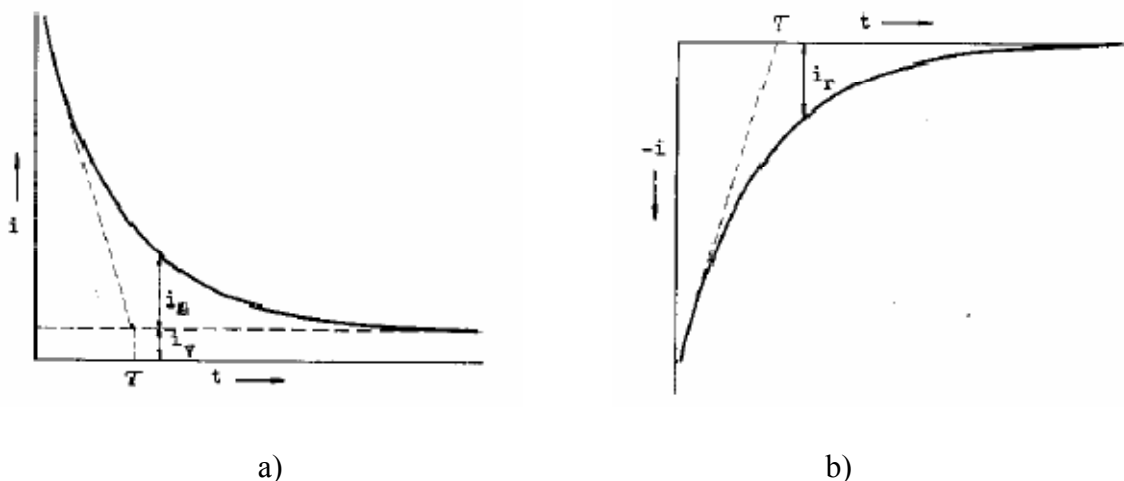
$$\rho_v = R_v \frac{S_{ef}}{h} = R_v \frac{\pi(d_m+c)^2}{4h} \quad (\Omega\text{m}; \Omega\text{m}^2, \text{m}) \quad (3.1)$$

kde S_{ef} je tzv. efektivní plocha měřicí elektrody tříelektrodového měřicího kondenzátoru, d_m je průměr měřicí elektrody, c je šířka mezery mezi měřicí a ochrannou elektrodou a h je tloušťka vzorku.

Po přiložení stejnosměrného napětí, začne vzorkem protékat proud, který exponenciálně klesá a je součtem tří proudů (Obr. 3.1):

- exponenciálně klesající proud, který nabíjí geometrickou kapacitu a klesá téměř okamžitě (s časovou konstantou 10^{-6} až 10^{-10} s) k nule
- exponenciálně klesající absorpční proud i_a , který klesá s časovou konstantou odpovídající relaxační době dielektrik taky k nule
- vodivostní proud i_v , který na čase prakticky nezávisí a je dán vodivostí izolantu

Jestliže po nabití zkratujeme měřicí a napětovou elektrodu, začne se prvek exponenciálně vybíjet. (obr. 3.2)



Obr. 3.1 a) Časová závislost nabíjecího proudu dielektrika(převzato z [9])

b) Časová závislost vybíjecího proudu dielektrika(převzato z [9])

3.1.2 Měření povrchové rezistivity

Povrchová rezistivita materiálu se rovná poměru intenzity elektrického pole a proudové hustoty na povrchu vzorku. Číselně se rovná odporu čtverce povrchu zkoušeného materiálu o straně 1 m, měřenému mezi dvěma elektrodami přiloženými na protilehlých stranách. [16]

Ze změřeného povrchového odporu R_p se vypočítá měrný povrchový odpor ρ_p podle vztahu:

$$\rho_p = R_p \frac{\pi(d_m + c)}{c} \quad (\Omega; \Omega, m, m) \quad (3.2)$$

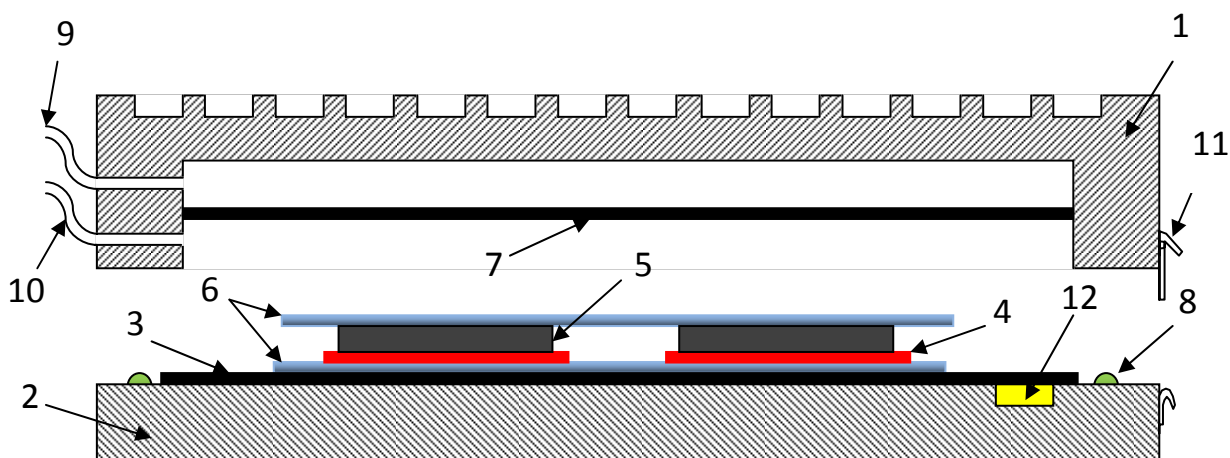
3.1.3 Výroba vzorků

K měření vnitřního a povrchového odporu byly určeny 4 materiály a celkově bylo vyrobeno 8 vzorků k měření. Jeden materiál byl použit na dvou vzorcích pro případ, že by při technologii výroby došlo k poškození. Jako spodní elektroda byly použity nerezové plechy o tloušťce 1mm a rozměrech 10cm x 10cm.

3.1.3.1 Laminátor

Laminátor se skládá ze spodní a horní části, které se před vložením vzorků musí oddělit. Jelikož je laminátor vyroben převážně z hliníku, k jeho manipulaci je použito hydraulické zvedací rameno. Spodní část se skládá z hliníkové podsady, která je překryta černou folií. Mezi ní, laminační folií a plechem je vložena ochranná fólie, která zabraňuje spojení laminačních folií s černou krycí folií laminátoru. Stejná folie se přiloží i z vrchní strany plechu. Po obvodu spodního dílu je silikonová vystouplá drážka, která za pomoci dalších spon slouží k těsnému přilnutí spodního a horního dílu. Horní díl obsahuje tutéž folii jako spodní, ale na rozdíl od spodního má dva vývody na obou stranách této folie. Ty slouží ke změně tlaku na obou stranách folie. Díky odsátí vzduchu na spodní straně, tam kde jsou umístěny prvky k laminaci a ponechání atmosférického tlaku na straně druhé, dojde k podtlaku, respektive k tlaku na prvky. Do horního hliníkového dílu jsou z horní strany vyfrézovány díry o průměru 3cm a hloubce asi 1cm. Tyto díry zmenšují váhu laminátoru a také zvyšují plošný obsah povrchu, díky tomu dochází k lepšímu chladnutí po

laminaci. Horní i spodní díl se spojují utěšňovacími sponami, kterých je po obvodu laminátoru 12.



- | | |
|----------------------------------|----------------------------|
| 1. Horní hliníkový díl | 7. Folie laminátoru |
| 2. Dolní hliníkový díl | 8. Silikonové těsnění |
| 3. folie laminátoru | 9. Horní odsávací trubice |
| 4. Laminační materiál (TPU, EVA) | 10. Dolní odsávací trubice |
| 5. Nerezový plech (10cmx10xm) | 11. Utěšňovací spony |
| 6. Ochranná folie | 12. Teplotní snímač |

Obr. 3.2 Model dvoukomorového laminátoru



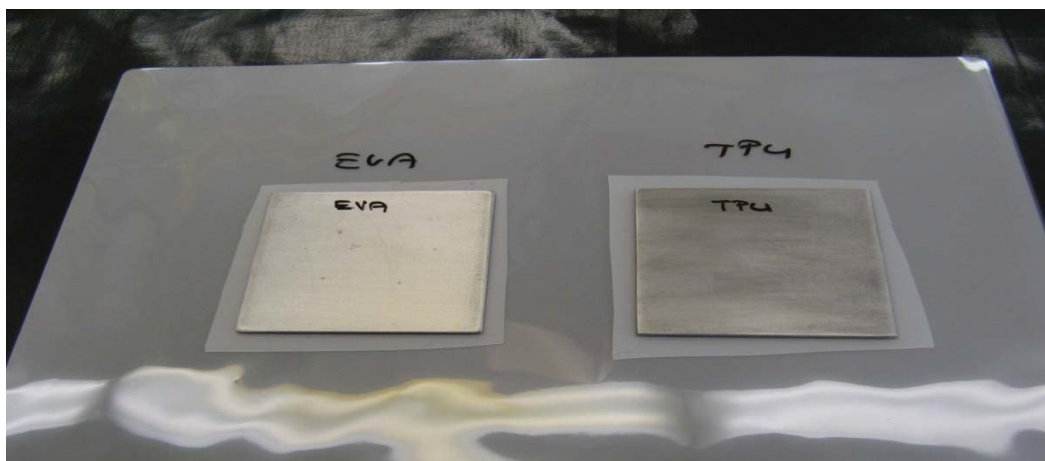
Obr. 3.3 Laminátor na ohřívací desce(převzato z [17])

3.1.3.2 Laminace vzorku EVA a TPU

K laminaci došlo ve firmě Solartec s.r.o v Rožnově p. Radhoštěm, která také poskytla dané laminační materiály. Tyto materiály (TPU a EVA) se vakuově nalaminovaly na předem nastříhané plechy. Před laminací došlo k důkladnému očištění, odmaštění a usušení povrchu plechů. EVA i TPU jsou folie o tloušťce asi 0,6mm. a jsou uskladněny v podobě rolí. Z nich byly nastříhány zhruba čtvercové kusy o rozměrech o něco větší než velikost plechů použitých pro laminaci.

K samotné Laminaci došlo v dvoukomorovém laminátoru. V něm se laminují celé fotovoltaické panely. V našem případě byly použity pouze 4 plechy(vzorky). Jednotlivé kroky laminace jsou následující:

- Uložení laminační folie s plechy (obr 3.4)
- Utěsnění laminátoru
- Zadání požadovaných parametrů do počítače
- Odsátí vzduchu horní i dolní odsávací trubicí
- Přenesení laminátoru na tepelnou podložku
- Ohřev na požadovanou teplotu (90°C),
- Do prostoru s horní odsávací trubicí vpuštění atmosférického tlaku
- Vytvrzování (teplota však stále stoupá až k 150°C)
- Ukončení laminace (zhruba po 45min)
- Přenesení laminátoru na chladicí pozici a chlazení ventilátory
- Dosažení požadované teploty (zhruba 50°C)
- Zavzdušnění spodní odsávací trubicí
- Konec



Obr. 3.4 Plechy, laminační folie a ochranná folie položena na spodní část laminátoru

3.1.4 Vyhotovení vzorků Epox 1 a Epox 2

Povrch nerezových plechů se před aplikací epoxidových pryskyřic důkladně očistil, odmastil a vysušil. Epoxidové pryskyřice jsou v zásadě dvousložková lepidla. Tyto lepidla se musejí namíchat v přesném poměru. Vzorek Epox 1 je firmou dodáván v dvoutubovém spojeném provedení. Tubu stačilo vložit do pistole a Epox 1 se automaticky míchal ve správném poměru. K nanášení docházelo ústí míchací trubice. Epox 2 se musel odvažovat a následně nalévat na plochu plechu. Bylo velmi důležité, aby pryskyřice na pleších vytvořily rovnoměrně silnou vrstvu. U obou materiálů docházelo při nanášení k vytvoření nežádoucích vzduchových bublinek, které jsou při měření vnitřní rezistivity zvláště rušivé. Bublínky byly odstraňovány hrotem dřevěné tyčinky a později také horkovzdušnou pistolí aplikovanou ze vzdálenosti asi 50cm. Vlivem krátkodobého zahřátí se materiál v daném místě stává řidší a vzduchové bublinky mohou lépe projít až na jeho povrch. Za pokojové teploty dochází k vytvrzení obou vzorků zhruba za 3hod. V našem případě jsme tento proces urychlili položením vzorků na topné těleso o teplotě 75°C, které bylo předem uvedeno do rovnovážné polohy, viz Obr. 3.5. Proces tvrdnutí probíhal na topném tělese po dobu 1h. Ani po této době nebyly pryskyřice dokonale vytvrzeny a manipulace se vzorky musela být opatrná.



Obr. 3.5 Urychlené tvrdnutí vzorků na topném tělese ERSA HP100 při 75°C

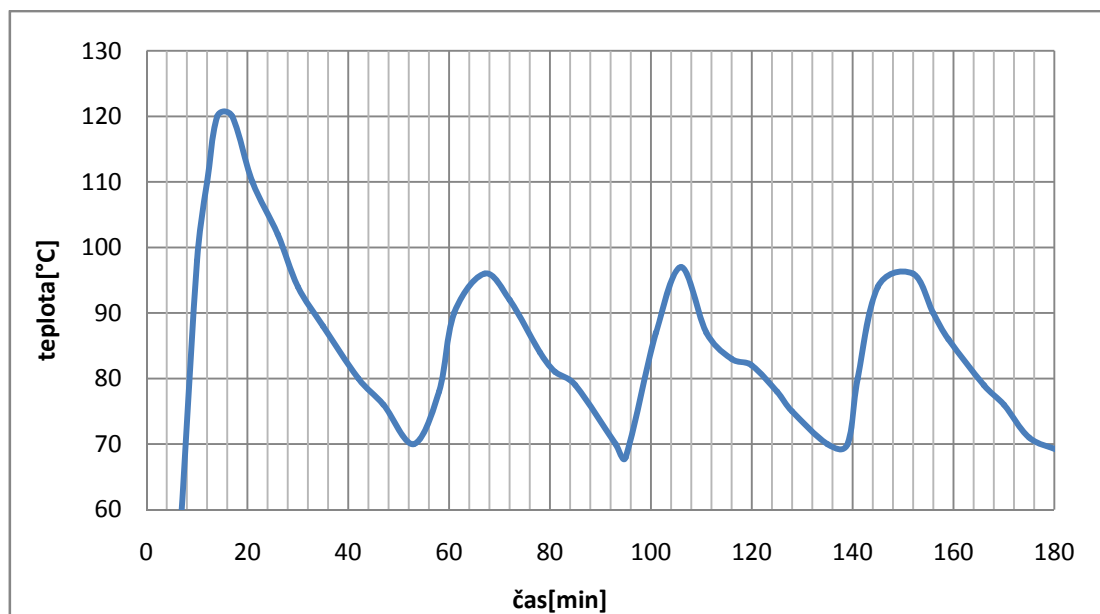
3.2 Úprava pece pro zrychlené stárnutí vzorků

Tepelné stárnutí vzorků probíhalo v peci Chirana STE31 (Obr 3.6). Jedná se o velmi starý typ pece. Nejprve musela být pec vyprázdněna a upravena do použitelného stavu. Z dřívějších měření pec obsahovala na stěnách BNC konektory na nichž byly na pevně, ze strany pece, připájeny měřicí elektrody. Všechny nepotřebné prvky byly pájkou odstraněny a vnitřek pece vyčištěn a osázen nosnými vzpěrami.

Pec má termostat otočen vůči stupnici, čili bylo nutné pec znovu ocejchovat a nastavit na přibližnou teplotu 80°C. Výměna vzduch v peci zapříčiňuje, že v horní části, kde se nachází teplotní čidlo, je teplota mnohem vyšší než teplota v nižších částech pece. Všechna stárnutí tedy probíhala v co nejvyšší poloze v peci. Nejhorší vlastnost pece byl obrovský teplotní rozptyl při nastavené teplotě v čase (Graf 3.1). Vkládání vzorků probíhalo nejdříve po 30min od zapnutí pece.



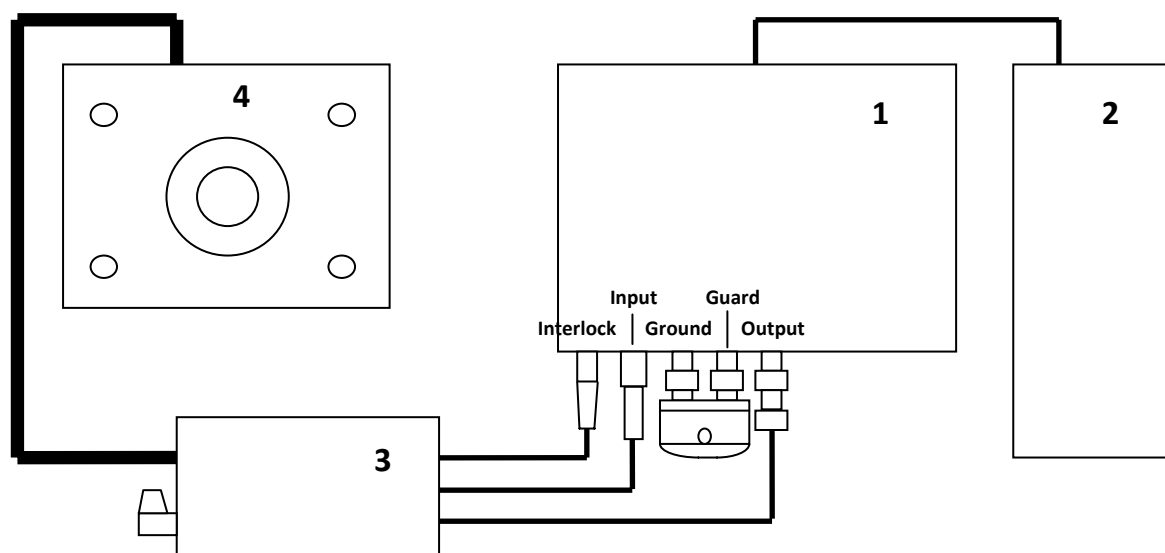
Obr. 3.6 Pec Chirana STE31 s plechy uvnitř



Graf 3.1 Teplotní profil pece v čase

3.3 Popis pracoviště

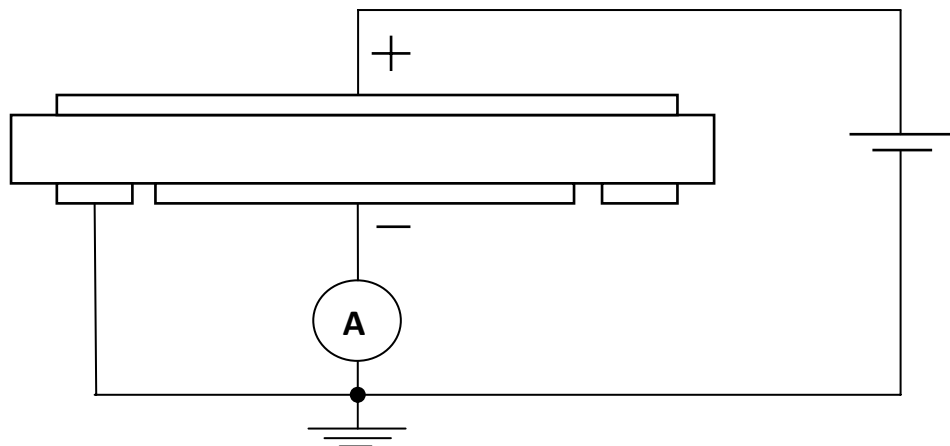
Měření vnitřního a povrchového odporu dielektrik probíhalo na pracovišti obr. 3.7.



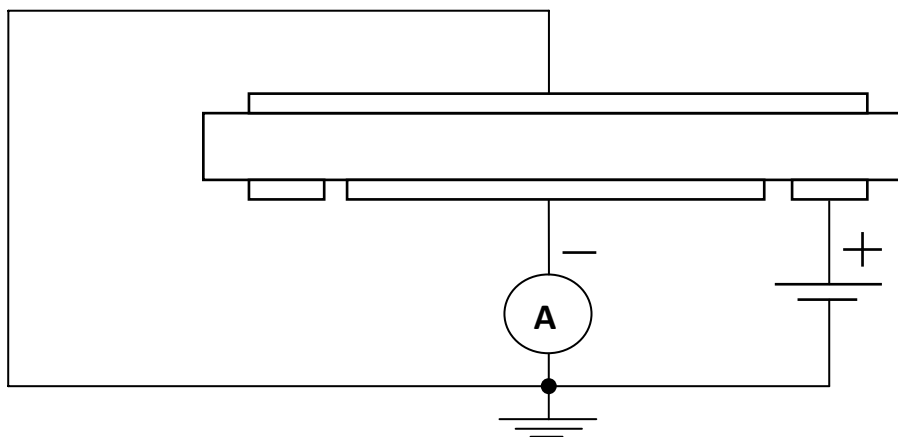
1. Megaohmmetr HP 4339B
2. PC – ovládací program
3. Přepínač mezi měření vnitřního a povrchového odporu
4. Tříelektrodový měřicí systém 16339A

Obr. 3.7 Schéma zapojení měřicí soustavy

Přepnutím přepínače měnícího režim měření odporu (vnitřní/povrchový), dojde ke změně propojení měřících elektrod. Schémata jsou uvedena v Obr. 3.8 a Obr. 3.9



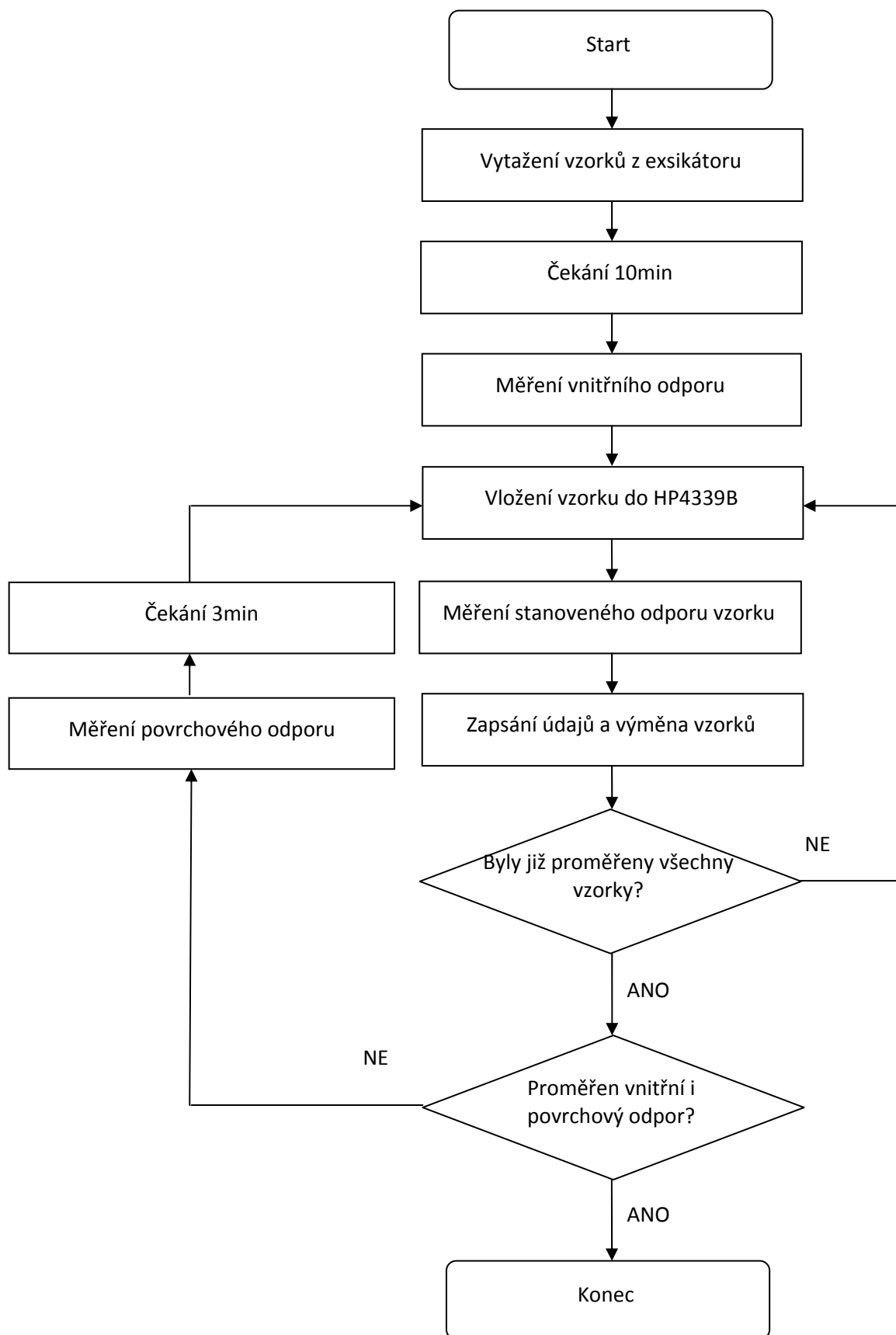
Obr. 3.8 Schéma zapojení pro měření vnitřního odporu



Obr. 3.9 Schéma zapojení pro měření povrchového odporu

3.4 Průběh měření

Po vytažení vzorků z pece vzorky nejprve zchladly a poté byly umístěny do exsikátoru nejméně na 24 hodin, kde se ustálila jejich relativní vlhkost. Vlastní měření vnitřního a povrchového odporu u všech vzorků je popsáno algoritmem na obr. 3.10. Tento algoritmus probíhal vždy stejně, aby byly zachovány stejné nebo alespoň obdobné parametry při měření. Především se to týkalo navlhání vzorků ze vzdušné vlhkosti.



Obr. 3.10 Schéma algoritmu měření vnitřního a povrchového odporu na HP4339B

3.4.1 Popis jednotlivých kroků

1. Vytažení vzorků z exsikátoru je prvním krokem, který předcházelo měření.
2. Vzorky byly na 10min ponechány na vzdušné vlhkosti laboratoře, aby se jejich vlhkost ustálila na přijatelné míře, při které již nedocházelo k největším změnám vnitřního a povrchového odporu v závislosti na čase, respektive změně relativní vlhkosti vzorků. Dalším důvodem bylo, že vzorky byly po každém tepelném stárnutí váženy, k čemuž bylo vyhrazeno právě zmíněných 10min.
3. Tříelektrodotový měřicí systém připojen na megaohmmetr HP 4339B byl přepnut do polohy pro měření vnitřního odporu, viz obr. 3.8.
4. Vzorek č. 1, následně 2, 3 a 4 byl položen na měřicí elektrody. Přítlak elektrod na vzorek byl zvolen 7Kg a ochranné víko uzavřeno. Napětí mezi elektrodami je 300V.
5. Obsluha spustila program na PC, který automaticky ovládal megaohmmetr a tříelektrodotový měřicí systém. Po spuštění programu bylo nastaveno stejnosměrné napětí mezi elektrodami 300V a proudový omezovač na max. 500 μ A. Po uplynutí $t = 60$ s megaohmmetr zaznamenal hodnotu R.
6. Vzorek byl vyjmut a vložen nový, to trvalo max. 30s. Po této době bylo spuštěno měření s novým vzorkem, aby se u každého měření dodržela přesná časová posloupnost. Pokud byly již vzorky 1, 2, 3 a 4 změřeny, došlo k přepnutí systému na měření povrchového odporu viz obr. 3.9.
7. Před novým měřením se vyčkalo 3min. Každý vzorek před novým měřením byl tedy odložen 7,5min. Za tuto dobu se jeho úroveň nabití stačila vrátit na přijatelnou úroveň.
8. Opakování kroků 5 a 6.

Tento postup se mezi jednotlivými tepelnými stárnutími opakoval 3x – 4x s časovým rozestupem měření min. 24 hodin. Každý materiál byl tedy v jednom stárnocím cyklu vícekrát proměřen. Jednotlivé výsledky byly porovnány a statisticky zprůměrovány. Pokud došlo u měření k výraznější odchylce, měření bylo anulováno.

Před vložením do pece byly plechy i samotný materiál očištěn destilovanou vodou, čímž byl odstraněn nežádoucí prach popřípadě mastnota. Na samotný materiál destilovaná voda neměla vliv a při zrychleném stárnutí v peci došlo k jeho vysušení.

3.5 Výsledky měření

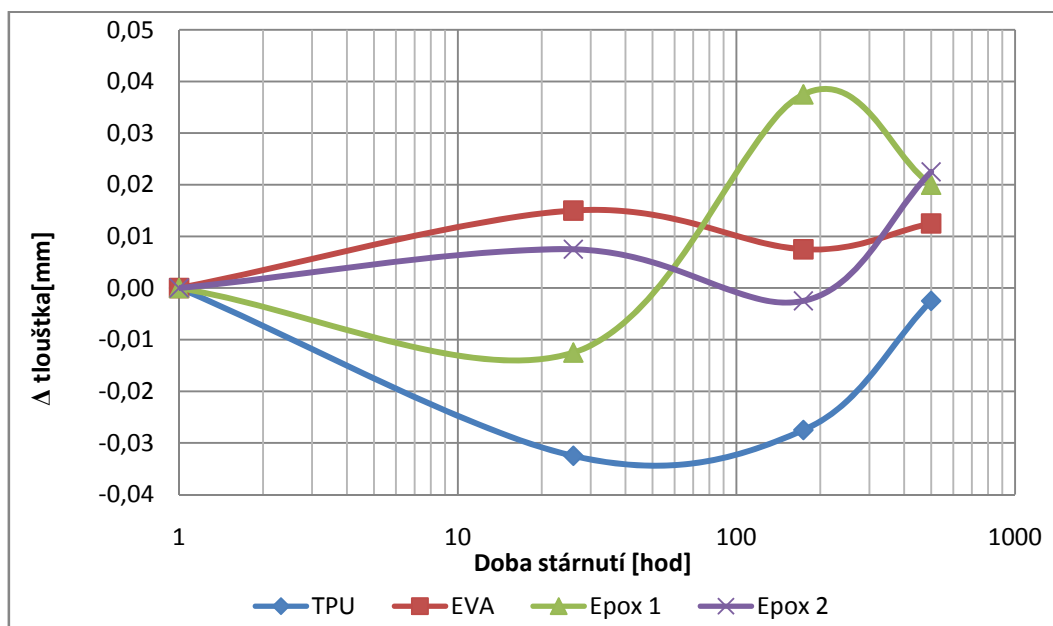
Výsledkem měření není jen samotný měrný vnitřní a povrchový odpor, ale celá řada dalších přidružených výsledků měření, která bylo zapotřebí udělat, abychom o chování zkoumaných materiálů při působení suchého tepla dostali komplexnější přehled. Také bylo třeba nalézt nejefektivnější metodu měření, která by eliminovala nejrůznější vlivy prostředí.

3.5.1 Změna tloušťky vzorků

Tloušťka vzorků se může měnit díky vysychání a dodatečné změně struktury materiálu vlivem tepelného působení. Proto v průběhu stárnutí byla zkoumána tloušťka materiálů a proměnná h upravována. Měření probíhalo mikrometrem. Průměrná hodnota byla počítána ze 4 hodnot měření, z nichž každé odpovídalo jedné straně čtvercového vzorku. Tato hodnota pak ve výpočtu byla používána po určitou dobu. To popisuje tabulka tab. 3.1 a následně Graf 3.2 zobrazuje absolutní změnu tloušťky vzorků v průběhu času.

| Vzorek | Tloušťka vzorků h [mm] | | | |
|---------|-------------------------------------|---------|------|------|
| | použití pro interval stárnutí [hod] | | | |
| | 0 - 10 | 26 - 94 | 174 | 500 |
| TPU | 1,6 | 1,57 | 1,57 | 1,6 |
| EVA | 1,59 | 1,61 | 1,6 | 1,61 |
| Epoxy 1 | 2,33 | 2,32 | 2,37 | 2,35 |
| Epoxy 2 | 2,23 | 2,23 | 2,22 | 2,25 |

Tab.3.1. Tloušťky materiálu v průběhu stárnutí



Graf. 3.2 Absolutní změna tloušťky vzorků v průběhu stárnutí

3.5.2 Změna hmotnosti vzorků

Zároveň se změnou tloušťky vzorků musí také docházet ke změně hmotnosti. Tato změna je způsobena snižováním či zvyšováním relativní vlhkosti vzorků a také odpařováním těkavých složek v materiálech, zvláště u Epox 1 a Epox 2. Grafy zobrazující změny hmotnosti vzorků jsou uvedeny v příloze A. Jednotlivá čísla měření v grafech (osa x) odpovídají určitému stavu vzorků v průběhu měření, popsané v tabulce na konci přílohy A.

K nevýraznějším změnám došlo mezi čísly měření 4 a 5, kdy došlo k prvnímu vložení do pece a tedy k nejradikálnější změně snížení hmotnosti. U Epox 1 a Epox 2 tento jev nastal především odpařením těkavých látek. U všech vzorků docházelo k postupnému snižování hmotnosti. Pouze Epox 2 od 7. měření začal pozvolna nabírat na váze.

3.5.3 Opakované měření vzorků

Je důležité znát změny vnitřního a povrchového odporu materiálů při opakovaném měření za sebou. V našem případě tato měření byla v rozestupu 6min u vnitřního a 6 - 11min u povrchového odporu. Celková doba měření byla 108min u vnitřního a 77min u povrchového odporu. Každá hodnota odpovídá stavu odporu v čase 60sec po přivedení napětí na elektrody měřeného vzorku. Grafy vytvořené z jednotlivých měření popisují časovou stálost měření, obzvláště pak vliv navlhání. Proto k měření došlo před samotným stárnutím. Znalosti získané z tohoto měření pomohly sestavit měřicí algoritmus popsany v kapitole 3.4. Grafy jsou uvedeny v příloze B.

Začátku měření předcházelo očištění povrchu vzorků a vysoušení v exsikátoru po dobu 44hod. Z teorie popsané v předešlých kapitolách můžeme předpokládat, že vzorky postupem času svou relativní vlhkost zvyšují. Tedy jejich vnitřní i povrchový odpor by měl v čase klesat. Grafy uvedené v příloze B nám tento předpoklad v případě vnitřního odporu potvrzují, i když při měření šlo k velkým rozptylům hodnot, zvláště u materiálu TPU. Epox 1 a Epox 2 mají v podstatě shodné průběhy. Jejich vnitřní odpor klesá strmě jen na počátku a po 50min už se ustaluje a klesá jen nepatrně. Vnitřní odpor u TPU a EVA s časem klesá s podobnou tendencí. Povrchový odpor předpoklad klesajícího odporu potvrdil jen u EVA a Epox 2. Povrchový odpor u Epox 1 a TPU s časem významně rostl. U tohoto měření také docházelo k velkým rozptylům hodnot a to až o jeden řád.

3.5.4 Měrný vnitřní a povrchový odpor

Naměřené hodnoty získané postupem popsáním v kapitole 3.4 je třeba přepočítat na měrný vnitřní a povrchový odpor. To provedeme pomocí vzorce 3.1 a 3.2, kde $d_m = 50\text{mm}$, $c = 10\text{mm}$ a h je tloušťka vzorku. Za R_v a R_p dosadíme naměřené hodnoty podle požadovaného odporu. Grafy popisující změnu měrného vnitřního odporu na čase tepelného stárnutí jsou uvedeny v příloze C a změny měrného povrchového odporu na čase tepelného stárnutí jsou uvedeny v příloze D. První dvě měření, v grafech na pozicích času stárnutí 1 a 3, neodpovídají tomuto času stárnutí, ale jsou takto zobrazeny, aby bylo možno grafy vytvořit a byly přehledné. Na pozici času stárnutí 1 měření proběhlo na nevysušeném vzorku a na pozici 3 na vysušeném. Další výsledky měření odpovídají popiskům grafu.

Předpokládané výsledky tohoto měření měly stanovit předpokládanou životnost funkčních vzorků testovaných materiálů. U všech měřených vzorků měl měrný povrchový i vnitřní odpor s časem stárnutí stoupající tendenci. U krycích materiálů pro fotovoltaické články se vyžaduje, aby tyto odpory byly co nejvyšší a hlavně, aby se jejich hodnota s časem výrazně nesnižovala. Nejvyšší vnitřní i povrchový odpor má Epox 2, zatímco nejnižší TPU, ovšem oba splňují požadované vlastnosti jako krycí a ochranné materiály pro fotovoltaické články. Všechny materiály zkouškou tepelného stárnutí prošly, naopak se jejich požadované vlastnosti zlepšily. Vysvětlují si to postupným vysoušením těchto materiálů. Pro parametry měření, doba stárnutí 500hod při 80°C, lze říci, že z hlediska vnitřního a povrchového odporu je životnost zkoumaných materiálů nekonečná.

Pro lepší pochopení, co se děje s vnitřním odporem materiálů po přiložení napětí na elektrody, slouží grafy v příloze E. Popisují velikost vnitřního odporu materiálu v rozsahu 0 – 300s. Toto měření proběhlo před stárnutím i po stárnutí. V tomto porovnání nejde o velikost vnitřního odporu, ale o jeho průběh a tedy o průběh proudu procházejícího materiálem. Zajímavý průběh má materiál TPU, kdy nejprve v první sekundě dochází k nárůstu odporu a v následujících 15sec se tento postupně snižuje. Z posledního grafu přílohy E je dobře vidět, jak se uplatňují jednotlivé složky proudu popsané v kapitole 3.1.1 před i po tepelném stárnutí u materiálu Epox 1.

3.5.5 Optické změny

Během tepelného stárnutí docházelo u materiálu Epox 1 a Epox 2 ke zhoršování optických vlastností. Již po 10hodinách stárnutí došlo k lehkému zežloutnutí u obou materiálů. Původní barva byla naprosto čirá, jak je vidět na Obr. 3.5. Stav materiálu po 500hod tepelného stárnutí je vidět na Obr. 3.11. Díky tomu dochází k menší účinnosti fotovoltaických panelů.



Obr. 3.11 Vliv tepelného stárnutí na optické vlastnosti Epox 1(vlevo) a Epox 2(vpravo)

4 Závěr

V teoretické části se práce zabývá historií a vznikem fotovoltaických článků, jejich skládáním do fotovoltaického panelu a popisem dielektrických vlastností materiálů používaných jako ochranné vrstvy fotovoltaického panelu. Také je vypracovaná rešerše norem zabývajících se degradačními testy.

Cílem práce bylo teoretické popsání vlastností materiálů používaných jako ochranné vrstvy fotovoltaických panelů. U vybraných materiálů určit změny jejich měrného vnitřního a povrchového odporu pomocí tepelného namáhání suchým teplem po dobu 500hod a určit předpokládanou životnost těchto materiálů.

Ve spolupráci s firmou Solartec s.r.o. byly vybrány 4 materiály pro praktickou část měření. Jde o materiály TPU, EVA a epoxidové pryskyřice Epox 1 a Epox 2. Z nich byly vyrobeny vzorky pro měření. EVA a TPU byly nalaminovány a Epox 1 a Epox 2 zality a vytvrzeny, to vše na nerezové plechy o velikosti 10 x 10cm, které zároveň sloužily jako elektroda v měřicím systému. Měření vnitřního a povrchového odporu probíhalo na tříelektrodovém měřicím systému 16339A ve spojení s megaohmmetrem HP 4339B. Na základě průběhů opakovaného měření vzorků (příloha C) byl sestaven i vhodný postup měření (kapitola 3.4), který měl maximálně eliminovat rušivé vlivy prostředí a velikost nabíjecích proudů dielektrik. Největší vliv na nepřesnost měření měla vzdušná vlhkost, která měnila povrchovou i vnitřní vlhkost měřených materiálů a docházelo tak ke zkreslení výsledků.

Výsledkem měření povrchového a vnitřního odporu materiálů, které byly vystaveny postupné degradaci po dobu 500hod suchému teplu při 80°C bylo, že jejich měrný povrchový i vnitřní odpor měl s časem lehce stoupající tendenci. Tedy jejich vlastnosti pro použití pro fotovoltaické panely se s časem zlepšily. Vysvětlují si to převážně postupným procesem vysychání vzorků a u epoxidových pryskyřic dotvrzováním. Předpokládanou praktickou životnost vzorků z těchto měření nelze určit. Teoretická životnost z pohledu vnitřního a povrchového odporu je však nekonečná. K největším změnám hodnot došlo u materiálu Epox 1. Jeho měrný povrchový odpor během stárnutí vzrostl o 205% a vnitřní odpor vzrostl o 426%. Naopak jako nejstálejší se projevoval materiál EVA. Při všech měřeních však docházelo k velkým rozptylům hodnot a jednotlivé body grafu jsou statistickým výsledkem mnoha měření.

Vlivem tepla docházelo u materiálu Epox 1 a Epox 2 k jejich žloutnutí, což má za následek zhoršení optických vlastností těchto materiálů. S tím je spojeno snižování

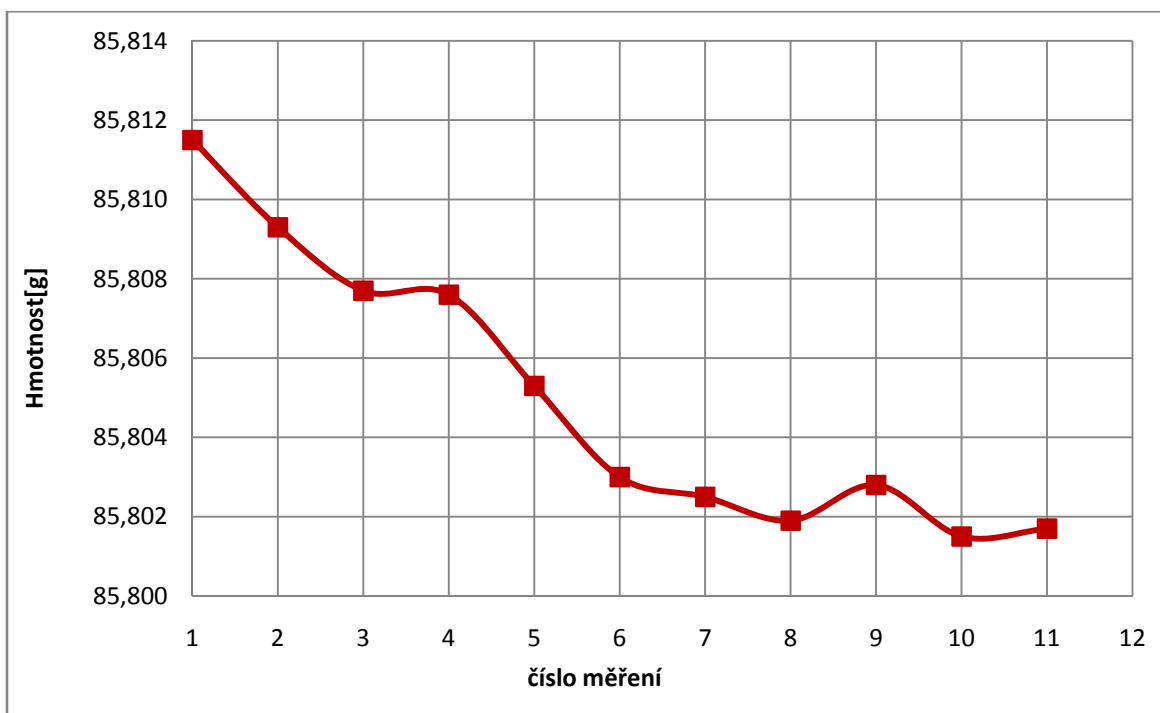
účinnosti fotovoltaických panelů, které tyto materiály používají v prostředí s vyšší teplotou.

5 Použitá literatura

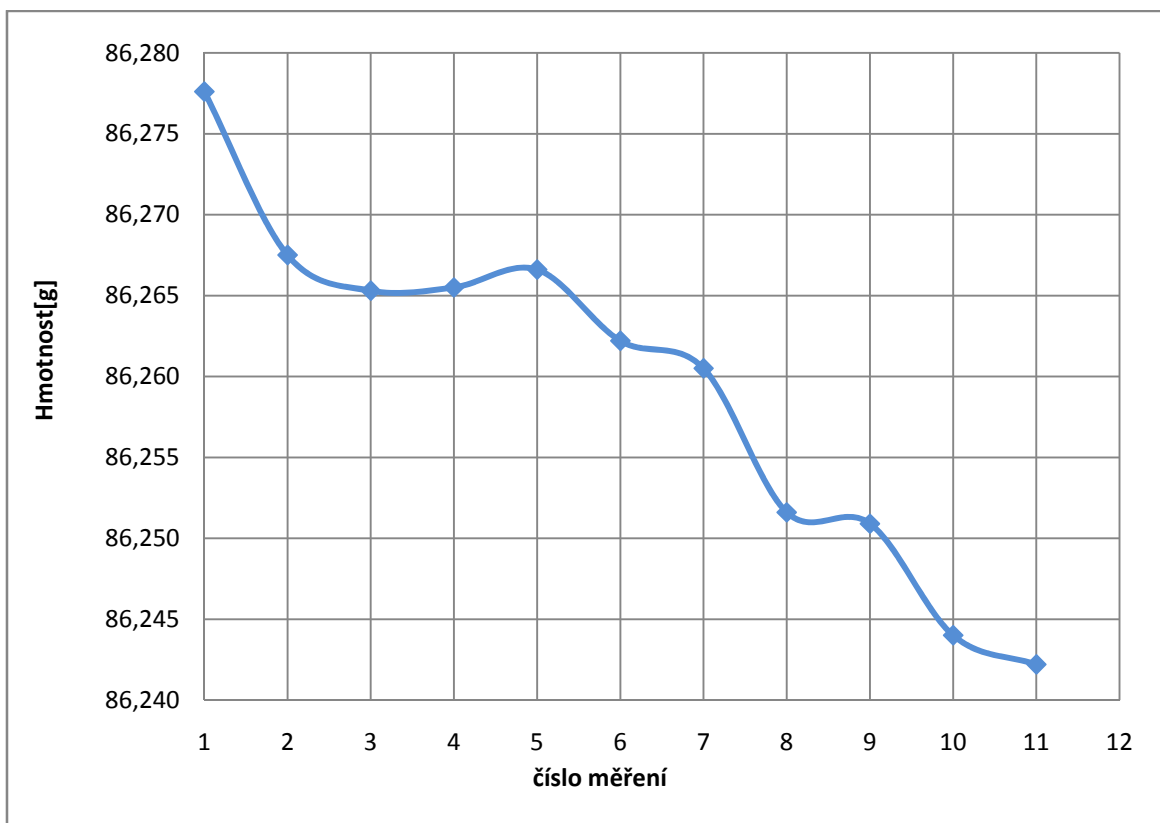
- [1] *Solární fotovoltaické články*, [online], [cit. 12.12.2006].
Dostupné z WWW: <<http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/slunce/slunce.htm>>.
- [2] POLSTEROVÁ H., *Spolehlivost v elektrotechnice*, Brno: Vysoké učení technické, 2003
- [3] STANĚK, K. Komponenty VF systémů [online]. [cit. 12.12.2006]
Dostupné z WWW:
<<http://fotovoltaika.fsv.cvut.cz/main.php?modul=teoriefv.komponenty>>.
- [4] MCEVOY, R.L. *Surface characterization of ethylene-vinyl acetate (EVA) and ethylene-acrylic acid (EAA) co-polymers using XPS and AFM*, 1998,
- [5] HASSDENTEUFEL J., DUBSKÝ J., RAPOŠ M., ŠANDERA J., *Elektrotechnické materiály*, Bratislava: Nakladatelství ALFA, 1971, ISBN 65-553-71
- [6] *DuPont Glass Laminating Solutions: Dupont SentryGlas Plus structural interlayers*, [online], [cit. 12.2.2008].
Dostupné z WWW: <<http://www2.dupont.com>>.
- [7] ŠEVČÍK, R. *Degradační testy funkčních vrstev solárních panelů s krystalickými solárními články*, 2005
- [8] KOCMAN, V. *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně 1971, s. 526.
- [9] KAZELLE, J., *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, s 273.
- [10] *Plexiglas*, [online], [cit. 14.03.2008].
Dostupné z WWW: <<http://www.zenit.cz/plexisklo-plexiglas.html>>.
- [11] JIRÁK, J. a kolektiv, *Materiály a technická dokumentace – část: Materiály v elektrotechnice*, Brno: Vysoké učení technické, 2003
- [12] ROZSÍVALOVÁ, Z., KŘIVÁK, P., VANĚK, J. *Materiály a technická dokumentace Laboratorní cvičení*.
- [13] Český normalizační institut, [online], [cit. 13.2.2008].
Dostupné z WWW: <<http://www.cni.cz>>.
- [14] Česká státní norma ČSN EN 61215 *Posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu Fotovoltaické moduly z krystalického křemíku*, 1997.
- [15] ČSN EN 61215. *Fotovoltaické (FV) moduly z krystalického křemíku pro pozemní použití – posouzení způsobilosti konstrukce a schválení typu*. Praha: Český normalizační institut, 1997. 40 s.
- [16] Použit: Materiály a technická dokumentace Laboratorní cvičení, Autoři textu: Ing. Zdenka Rozsivalová Ing. Petr Křivák, Ph.D. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [17] KOVÁŘ, J. *Degradační testy funkčních vrstev solárních panelů s krystalickými solárními články*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 90 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

6 Přílohy

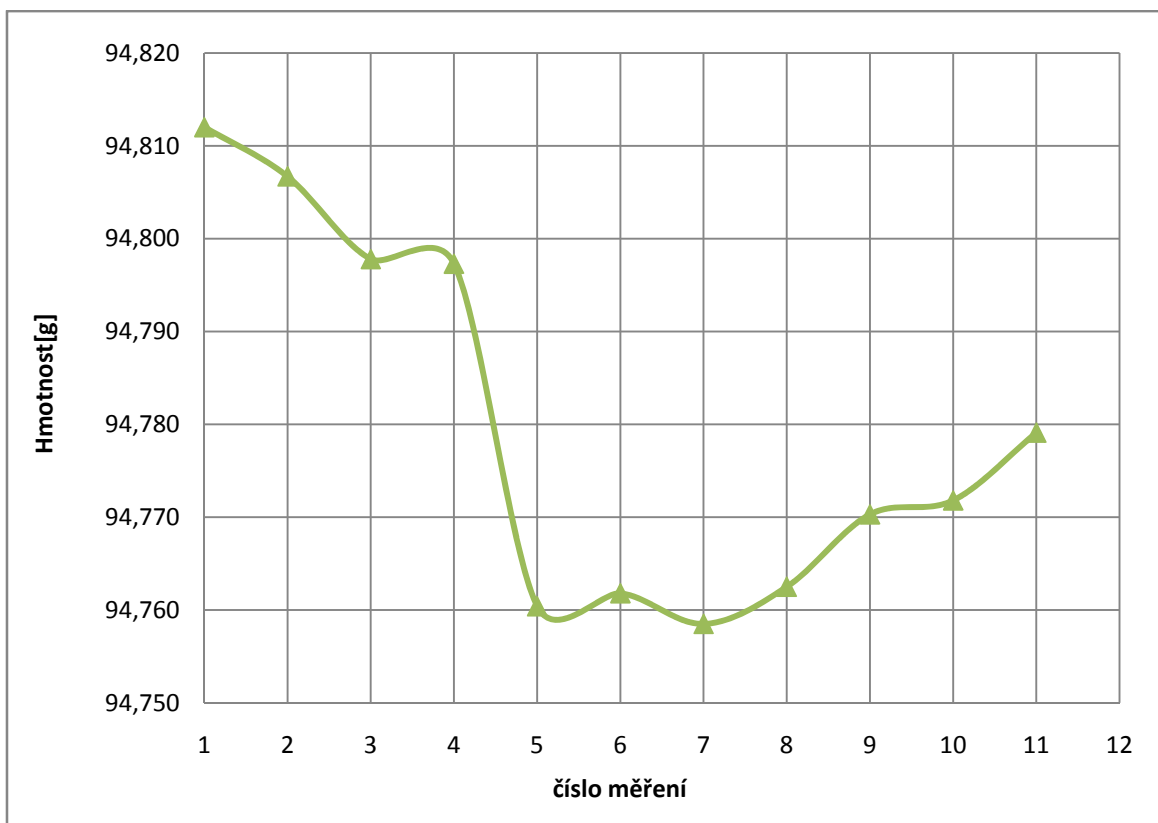
6.1 Příloha A



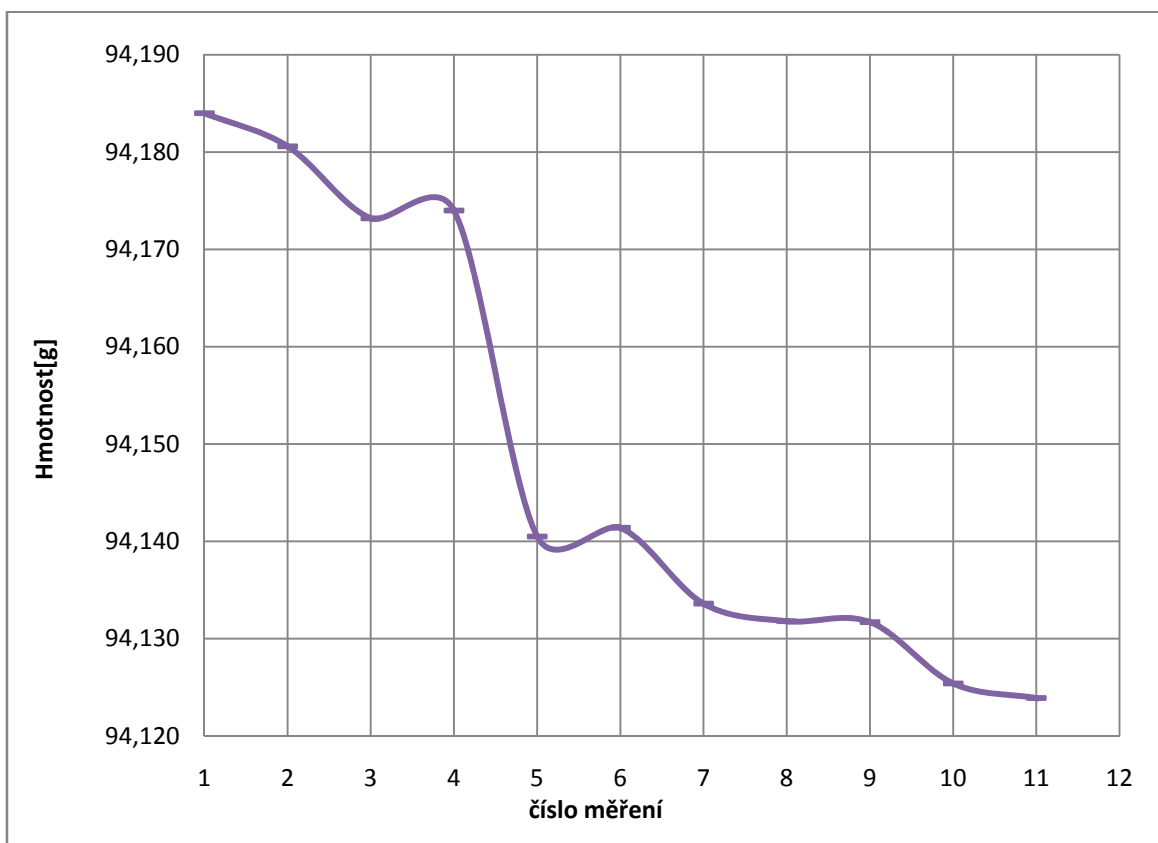
Obr. A1 Změna hmotnosti TPU vlivem tepelného vysychání



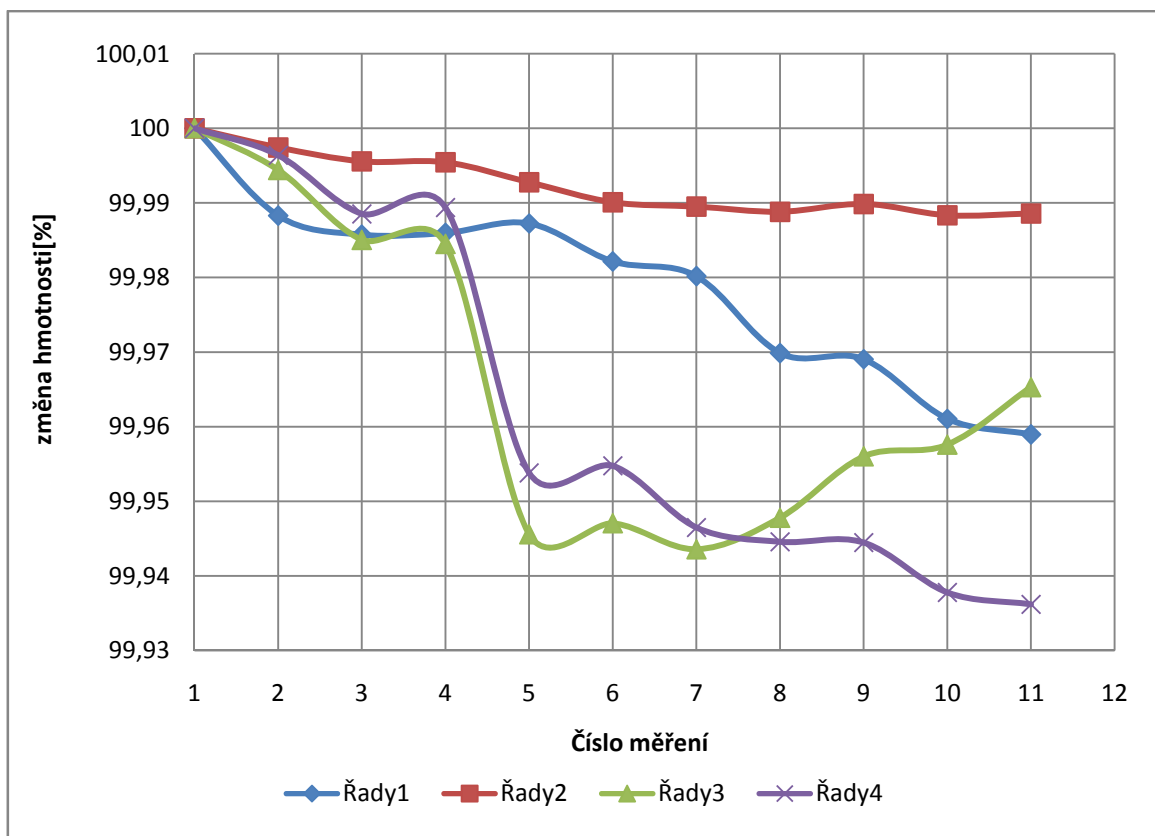
Obr. A2 Změna hmotnosti EVA vlivem tepelného vysychání



Obr. A2 Změna hmotnosti Epox 1 vlivem tepelného vysychání



Obr. A4 Změna hmotnosti Epox 2 vlivem tepelného vysychání

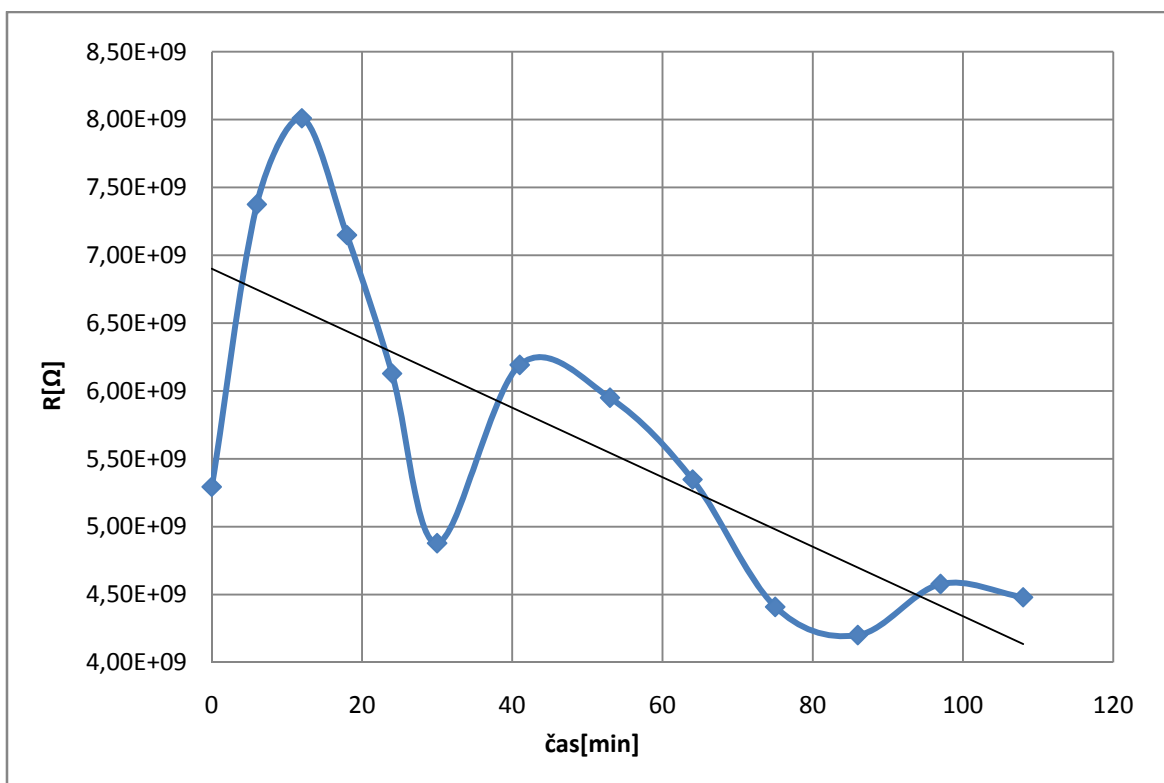


Obr. A5 Změna hmotnosti všech vzorků vlivem tepelného vysychání

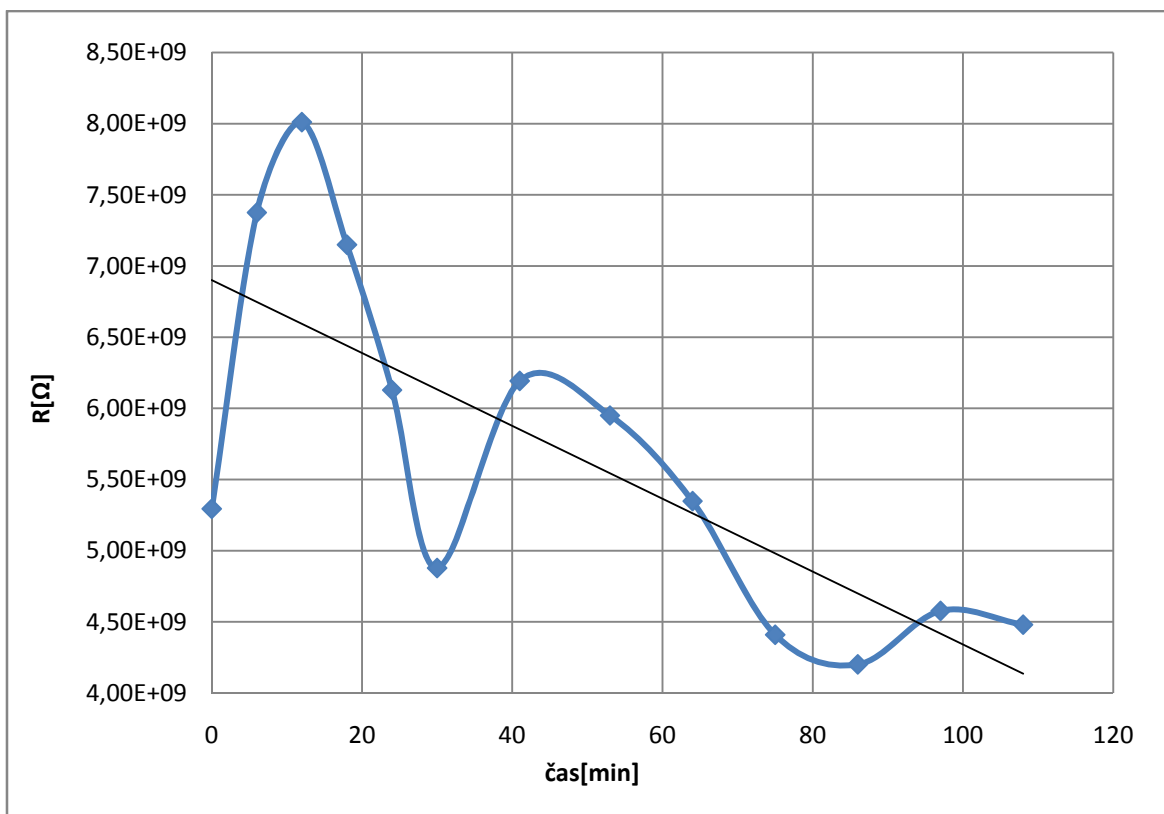
| číslo měření | popis stavu vzorků |
|--------------|--|
| 1 | ihned po výrobě vzorků (po laminaci a vytvrnutí) |
| 2 | před první úpravou vzorků |
| 3 | čištění a sušení vzorku v exikátoru 24h |
| 4 | sušení vzorku v exikátoru 48h |
| 5 | po prvním vytažení z pece a 24h v exikátoru, doba stárnutí 10h |
| 6 | po vytažení z pece a 24h v exikátoru, doba stárnutí 26h |
| 7 | po vytažení z pece a 24h v exikátoru, doba stárnutí 51h |
| 8 | po vytažení z pece a 24h v exikátoru, doba stárnutí 84h |
| 9 | po vytažení z pece a 24h v exikátoru, doba stárnutí 174h |
| 10 | po vytažení z pece a 24h v exikátoru, doba stárnutí 314h |
| 11 | po vytažení z pece a 24h v exikátoru, doba stárnutí 500h |

Tab. A6 Změna hmotnosti Epox 2 vlivem tepelného vysychání

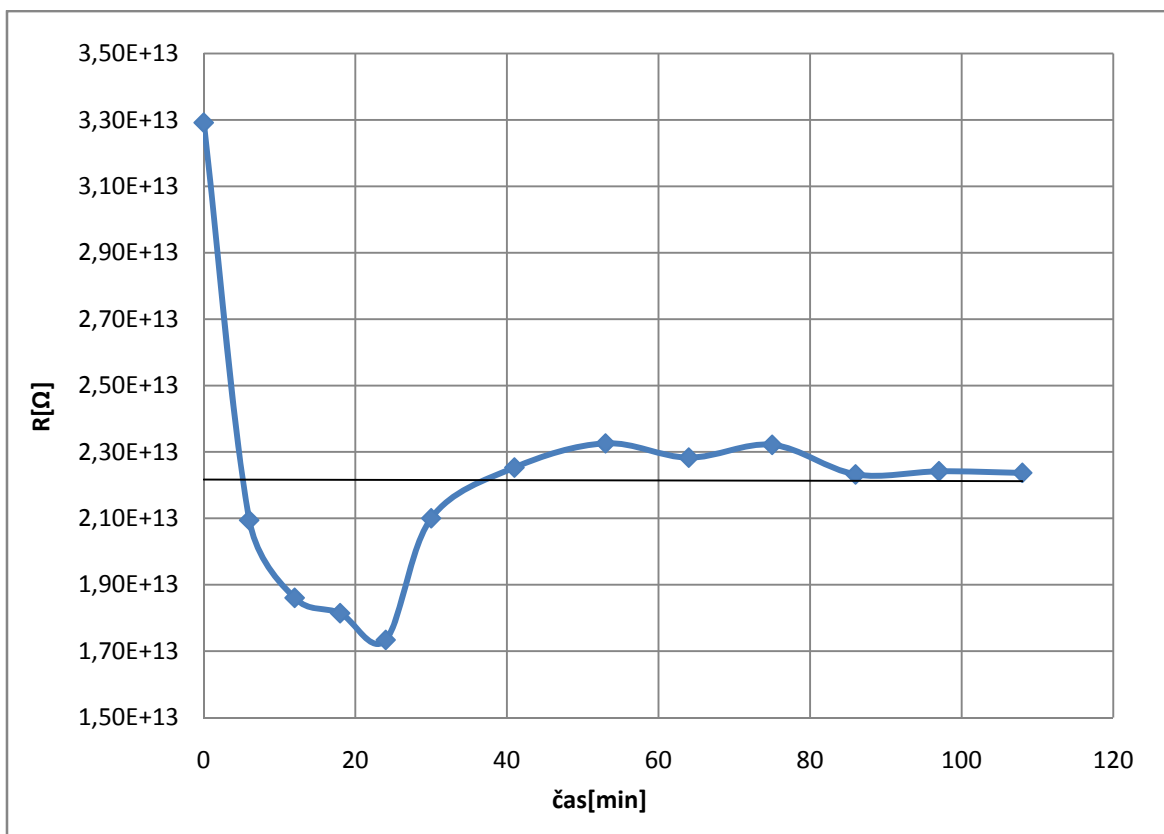
6.2 Příloha B



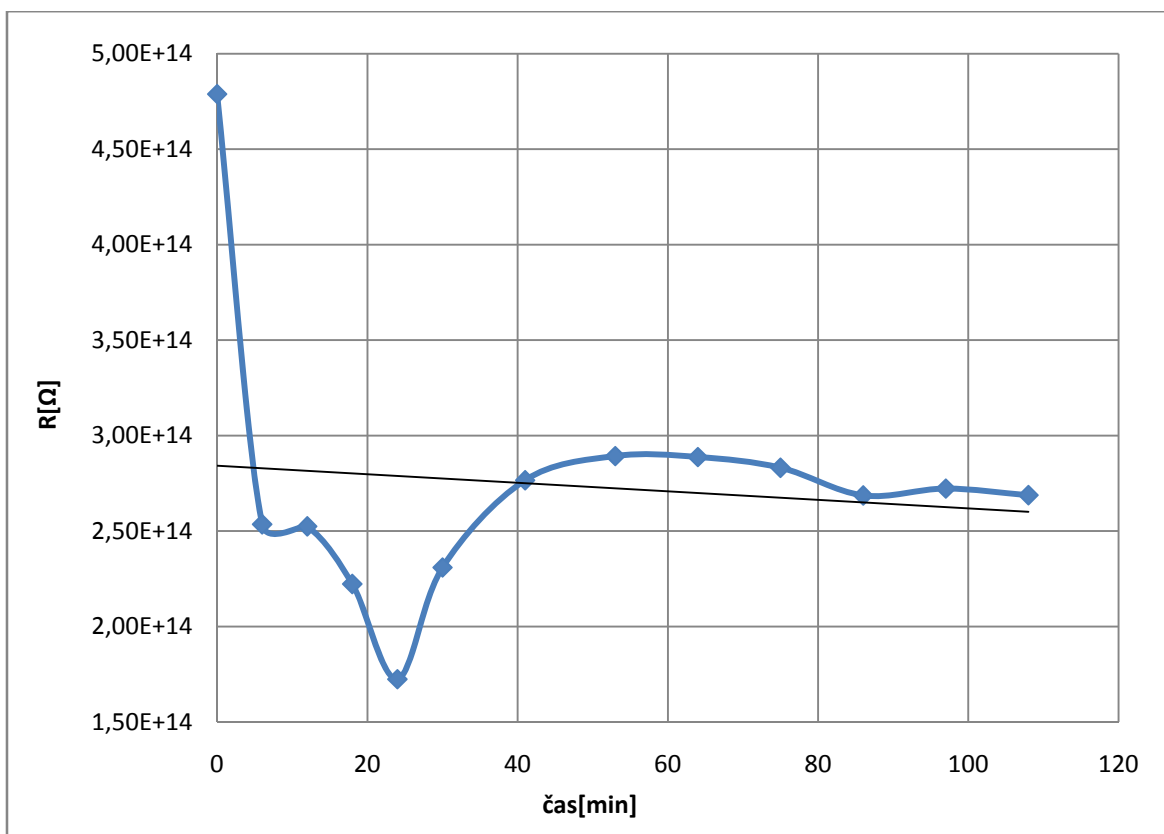
Obr. B1 Opakované měření vnitřního odporu materiálu TPU



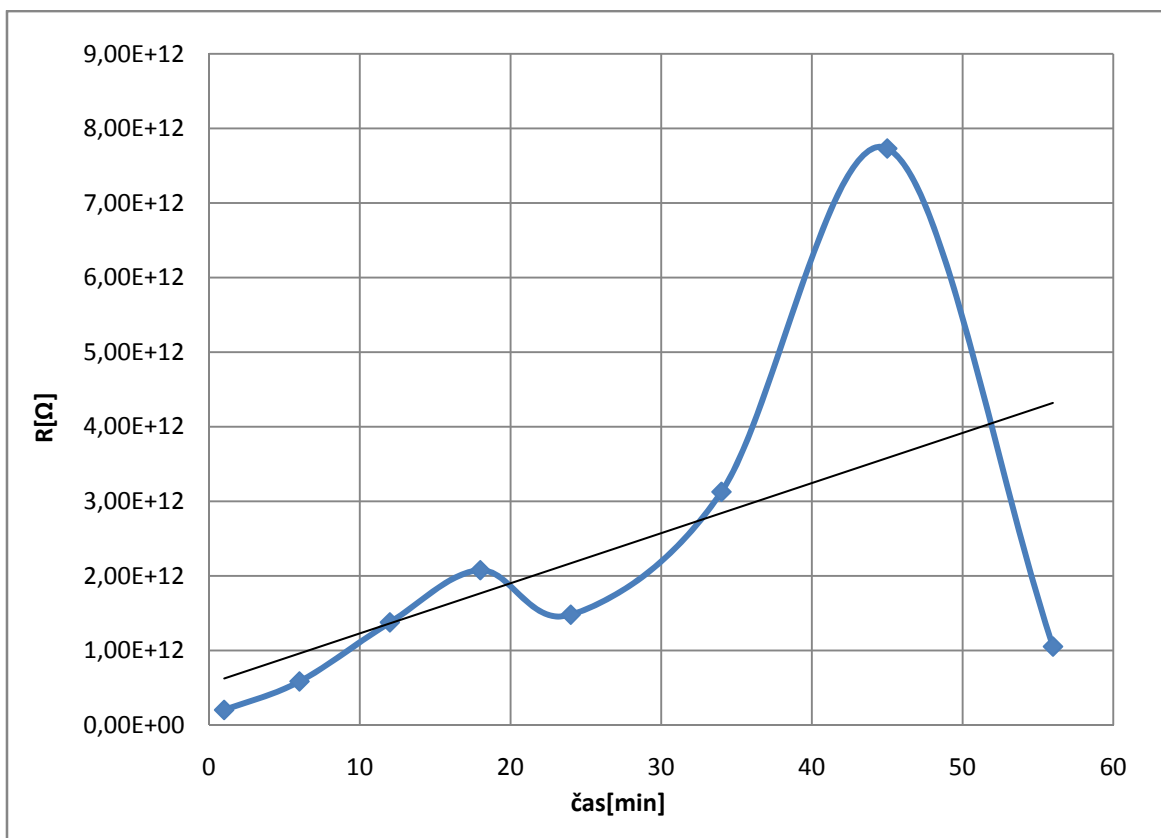
Obr. B2 Opakované měření vnitřního odporu materiálu EVA



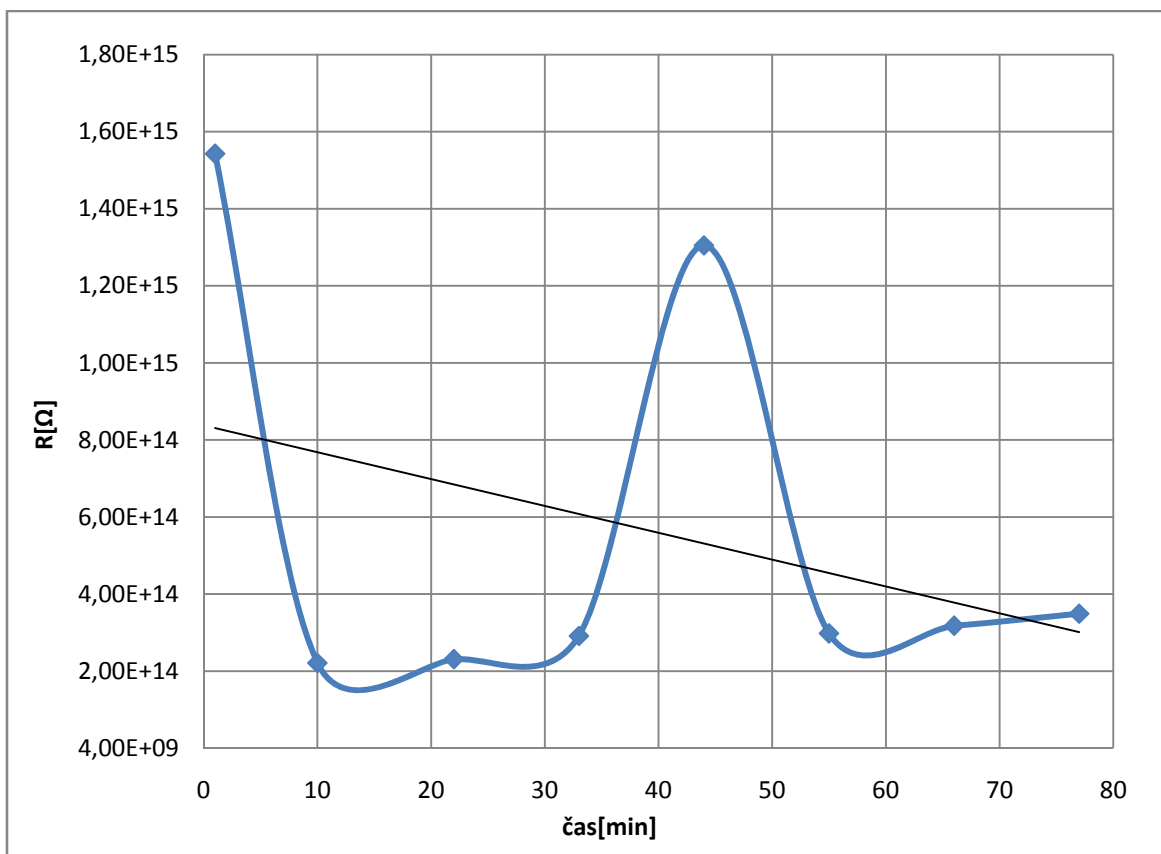
Obr. B3 Opakované měření vnitřního odporu materiálu Epox 1



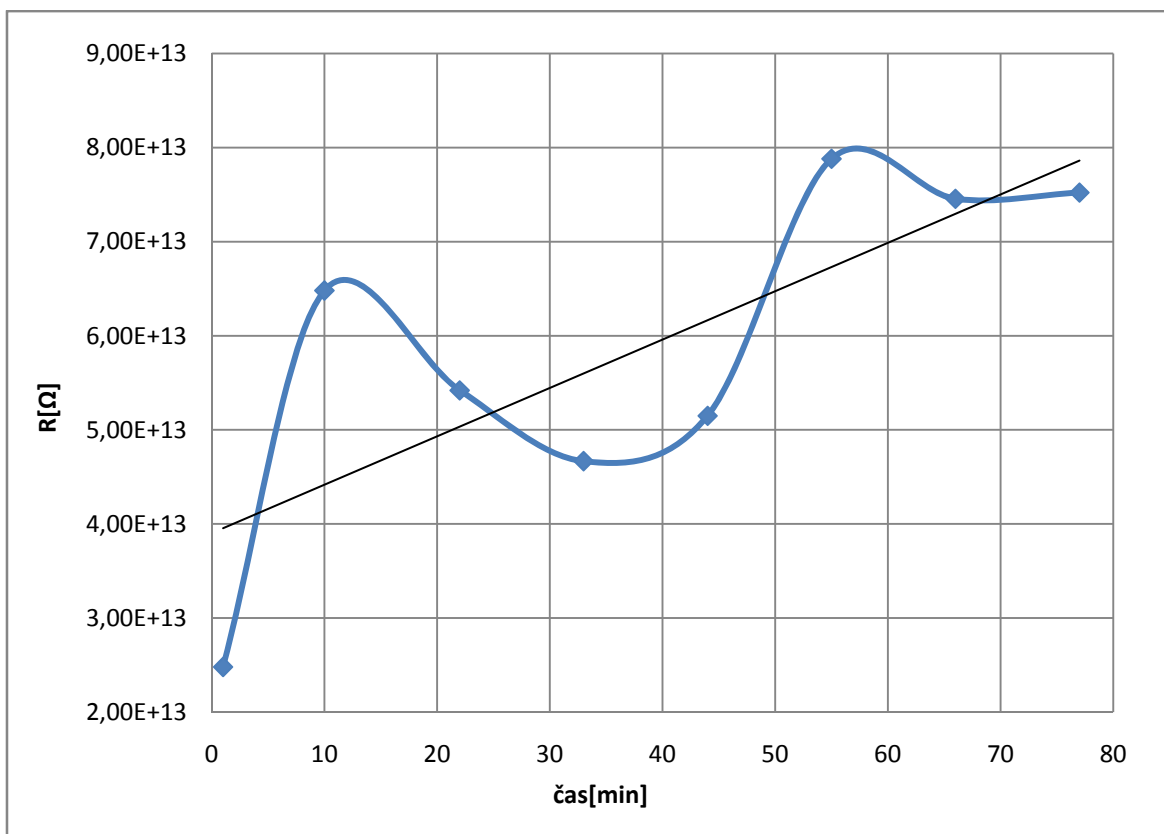
Obr. B4 Opakované měření vnitřního odporu materiálu Epox 2



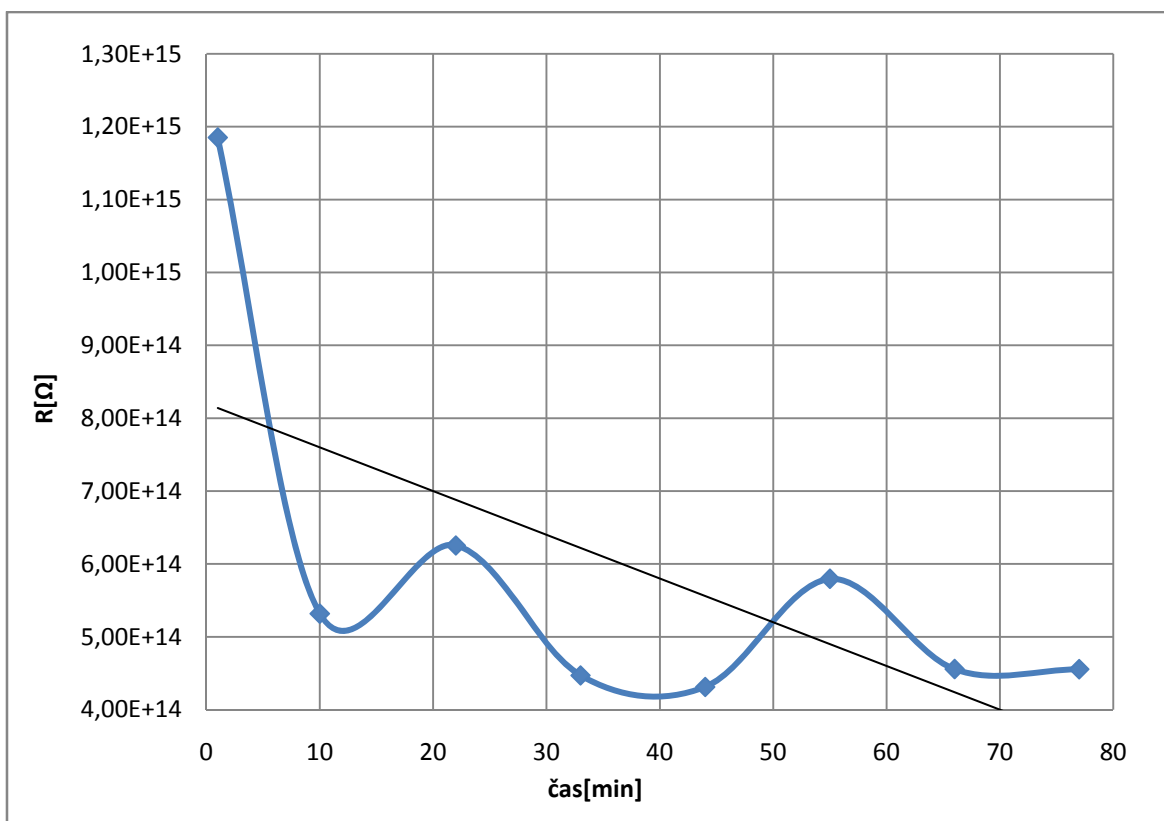
Obr. B5 Opakované měření povrchového odporu materiálu TPU



Obr. B6 Opakované měření povrchového odporu materiálu EVA

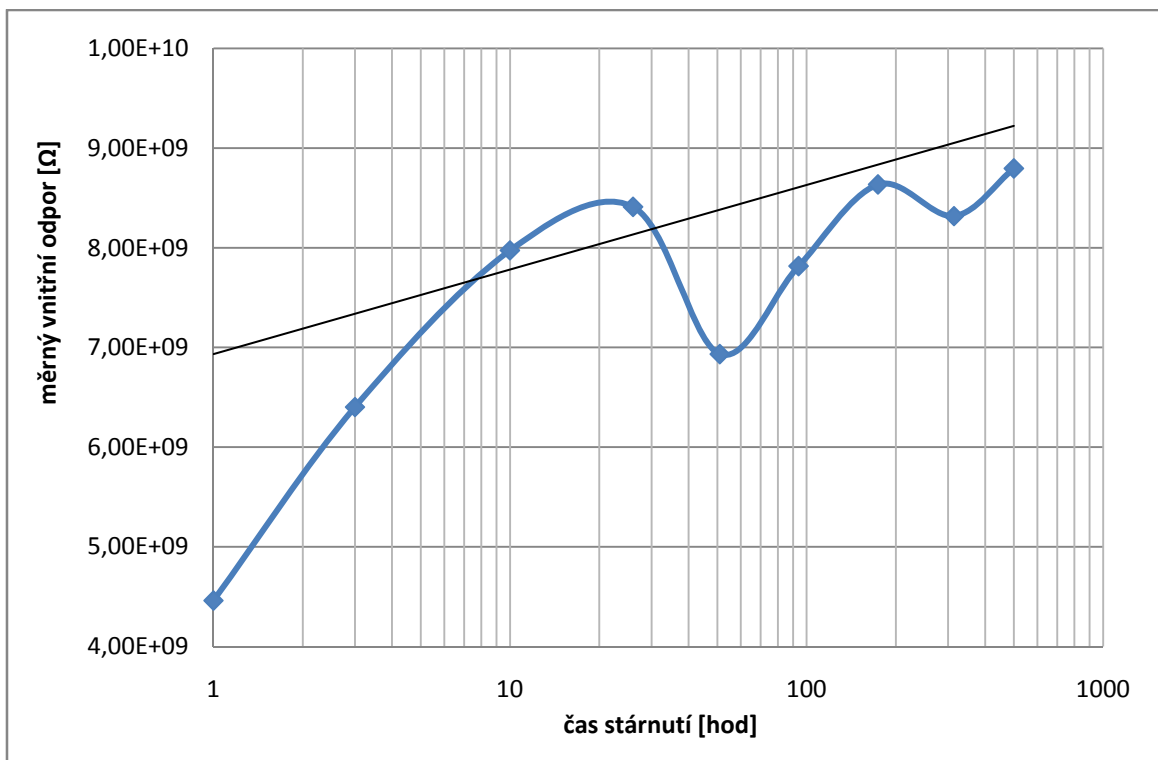


Obr. B7 Opakované měření povrchového odporu materiálu Epox 1

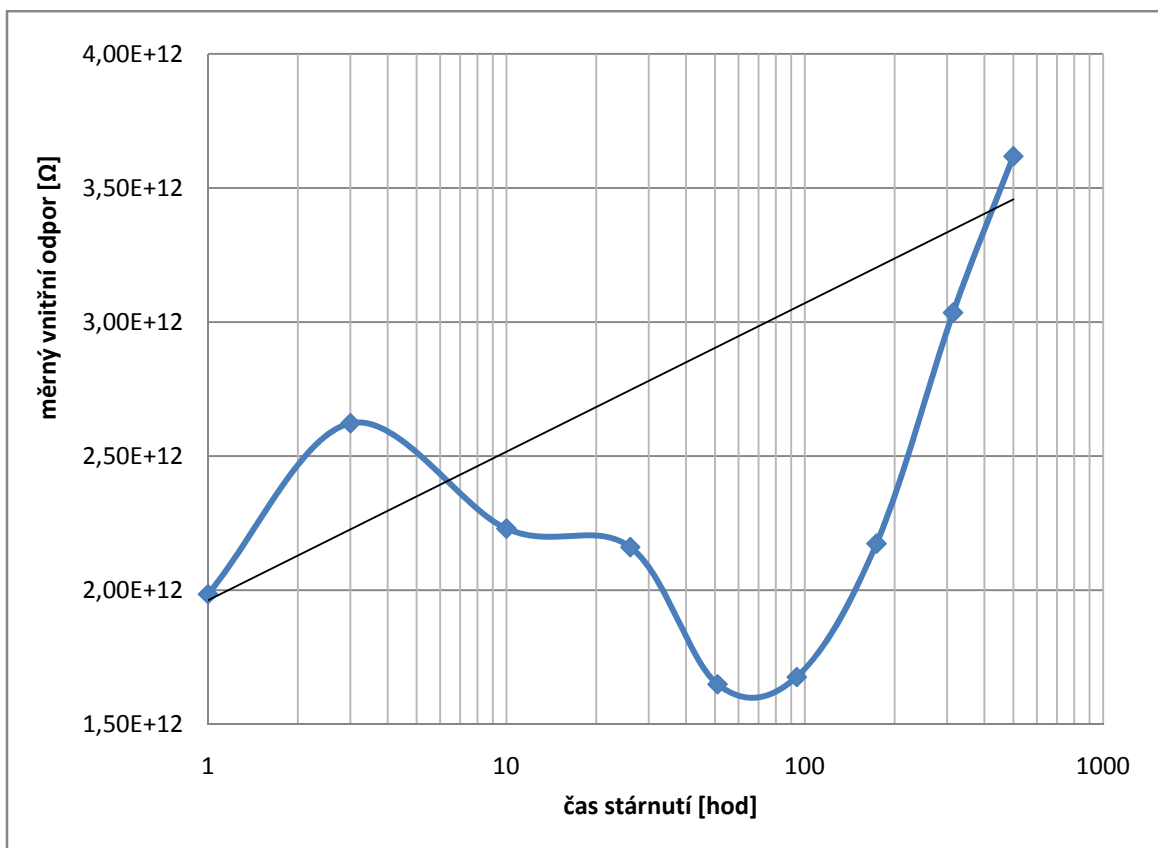


Obr. B8 Opakované měření povrchového odporu materiálu Epox 2

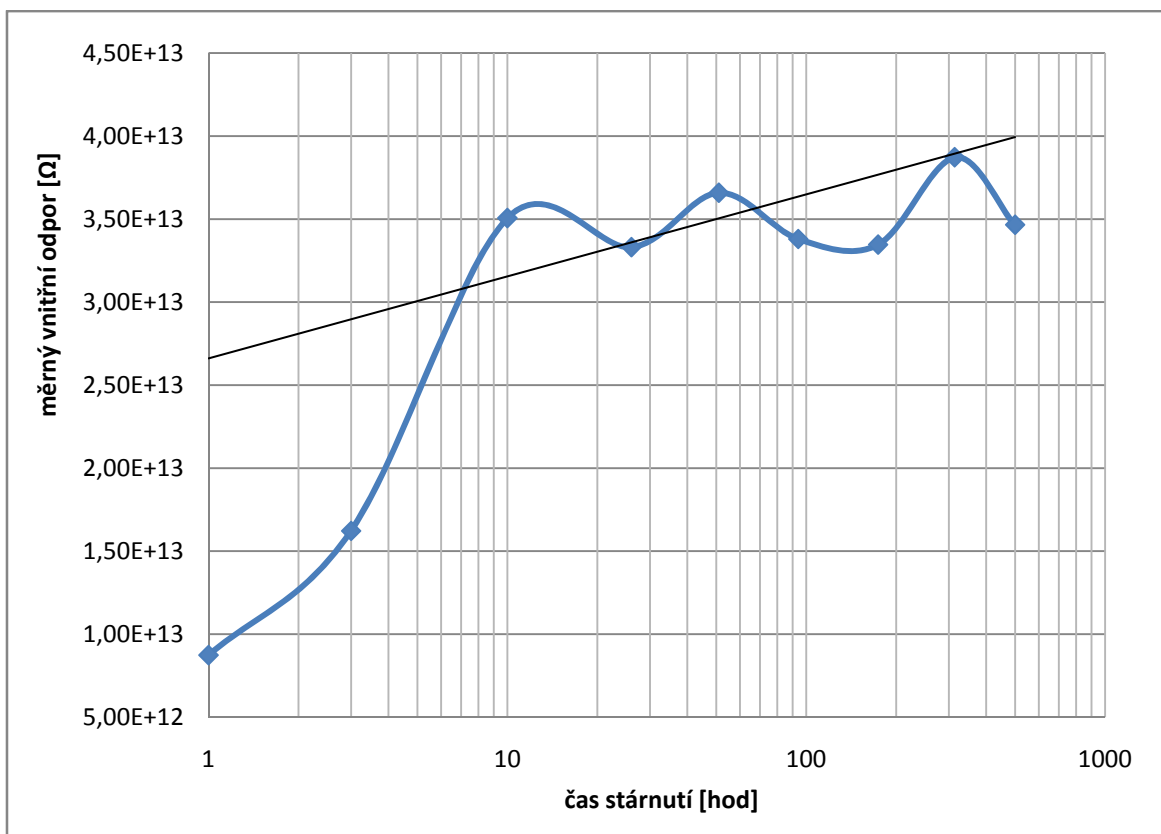
6.3 Příloha C



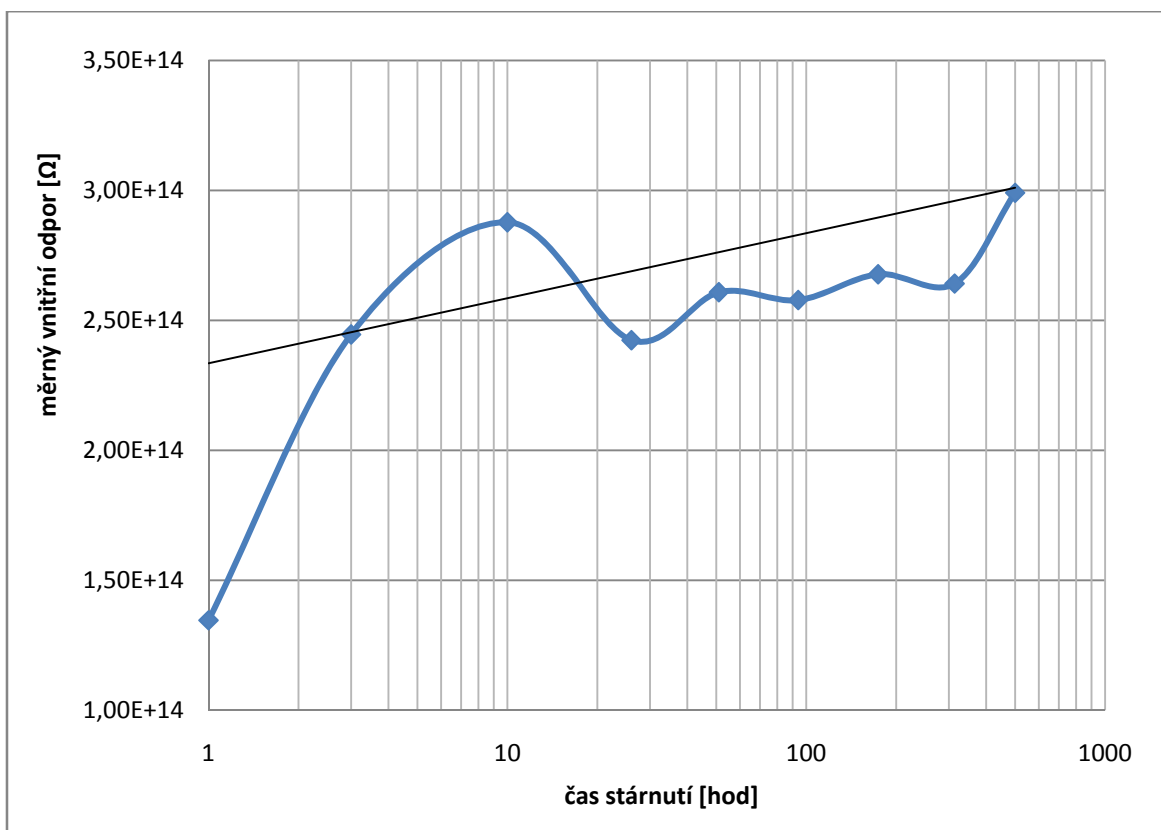
Obr. C1 Měrný vnitřní odpor materiálu TPU



Obr. C2 Měrný vnitřní odpor materiálu EVA

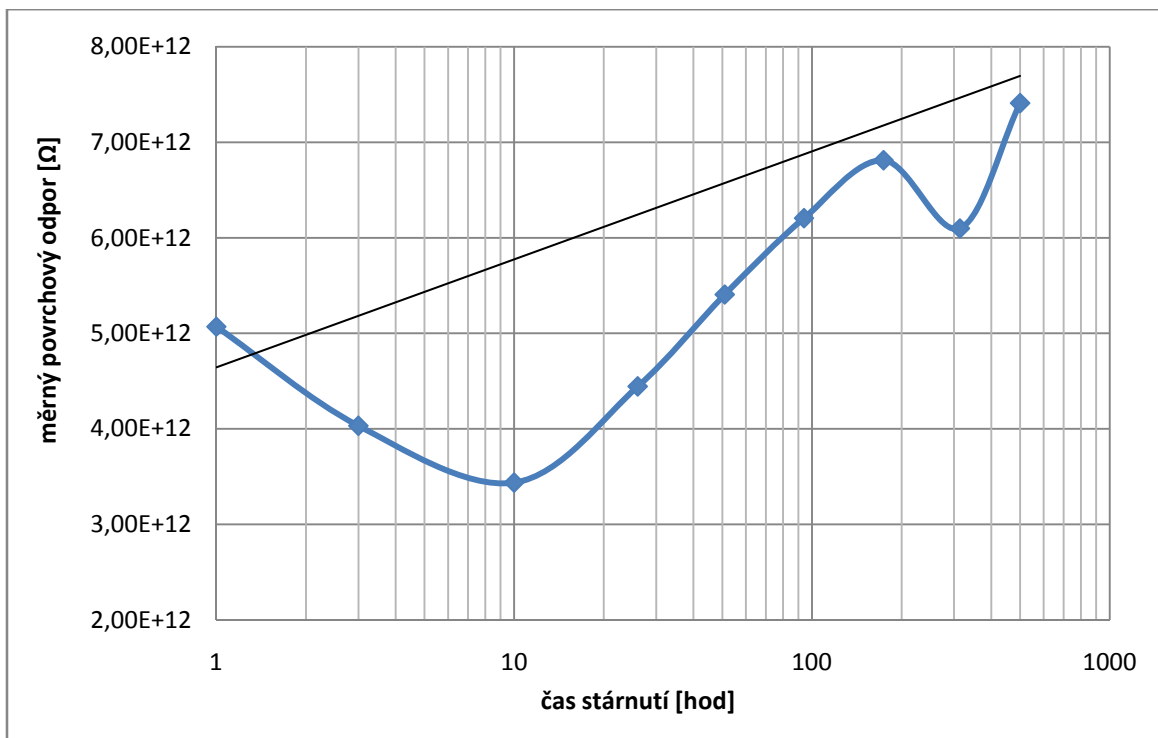


Obr. C3 Měrný vnitřní odpor materiálu Epox 1

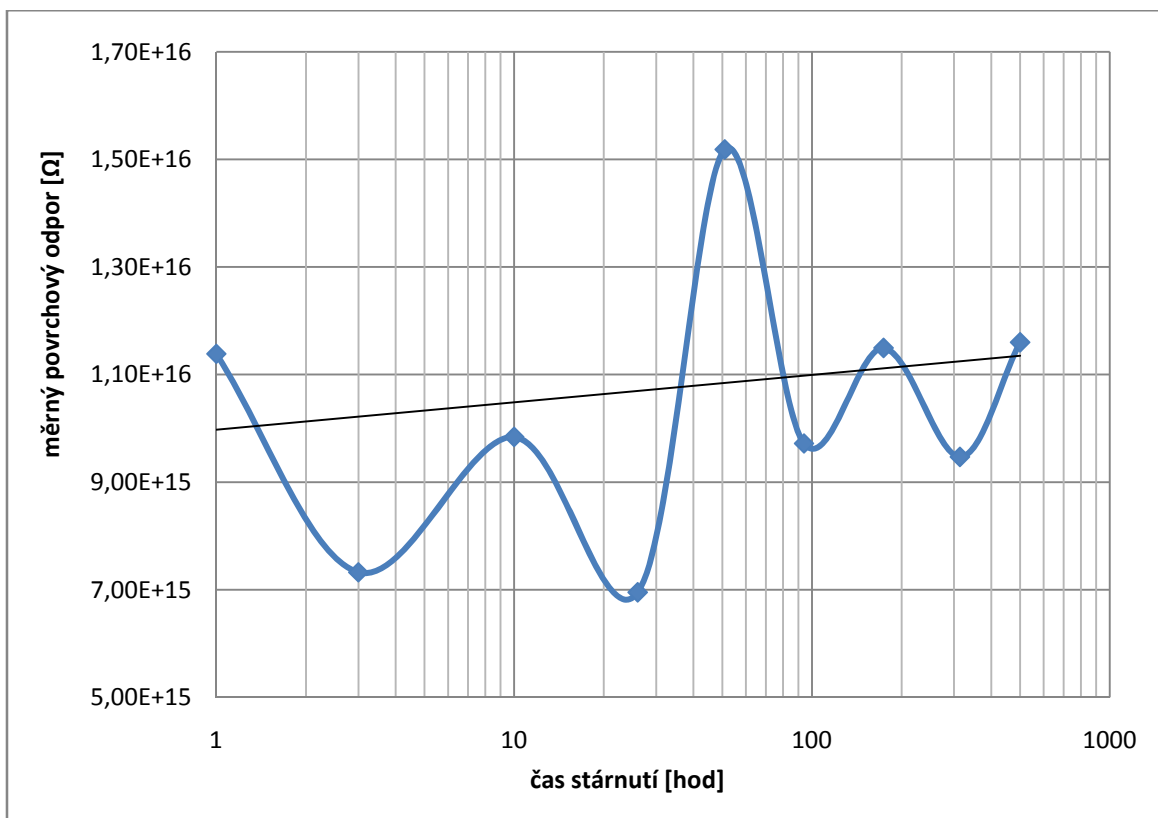


Obr. C4 Měrný vnitřní odpor materiálu Epox 2

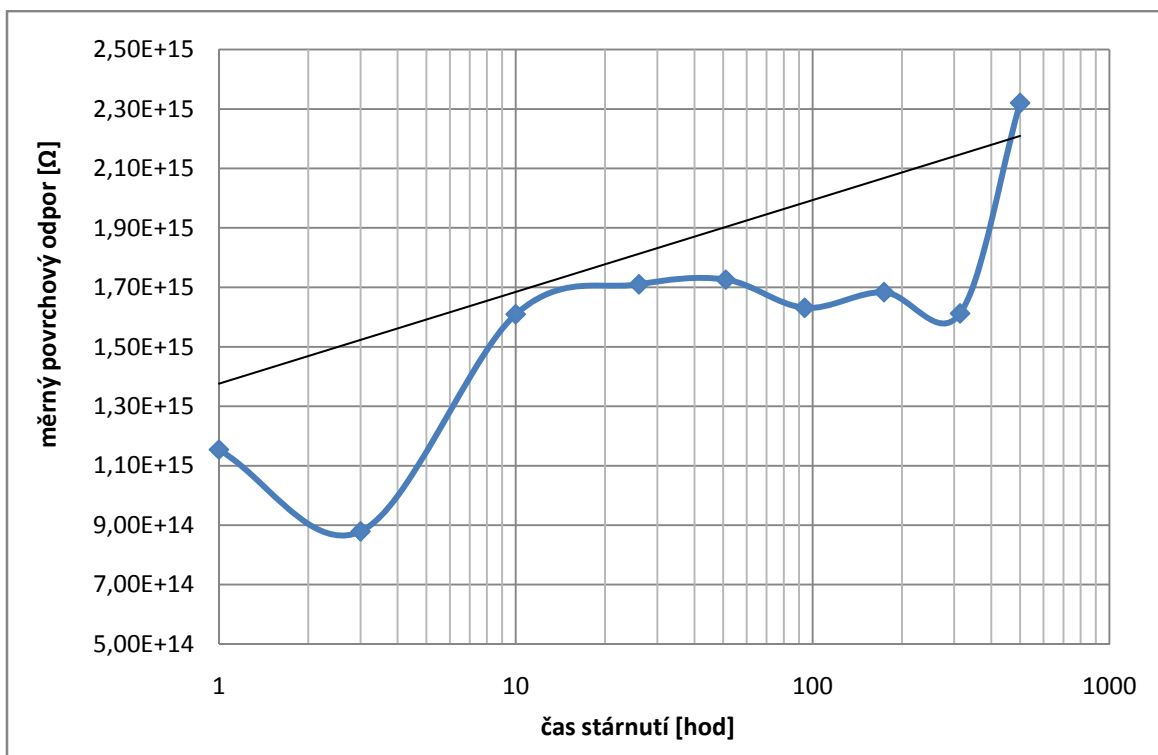
6.4 Příloha D



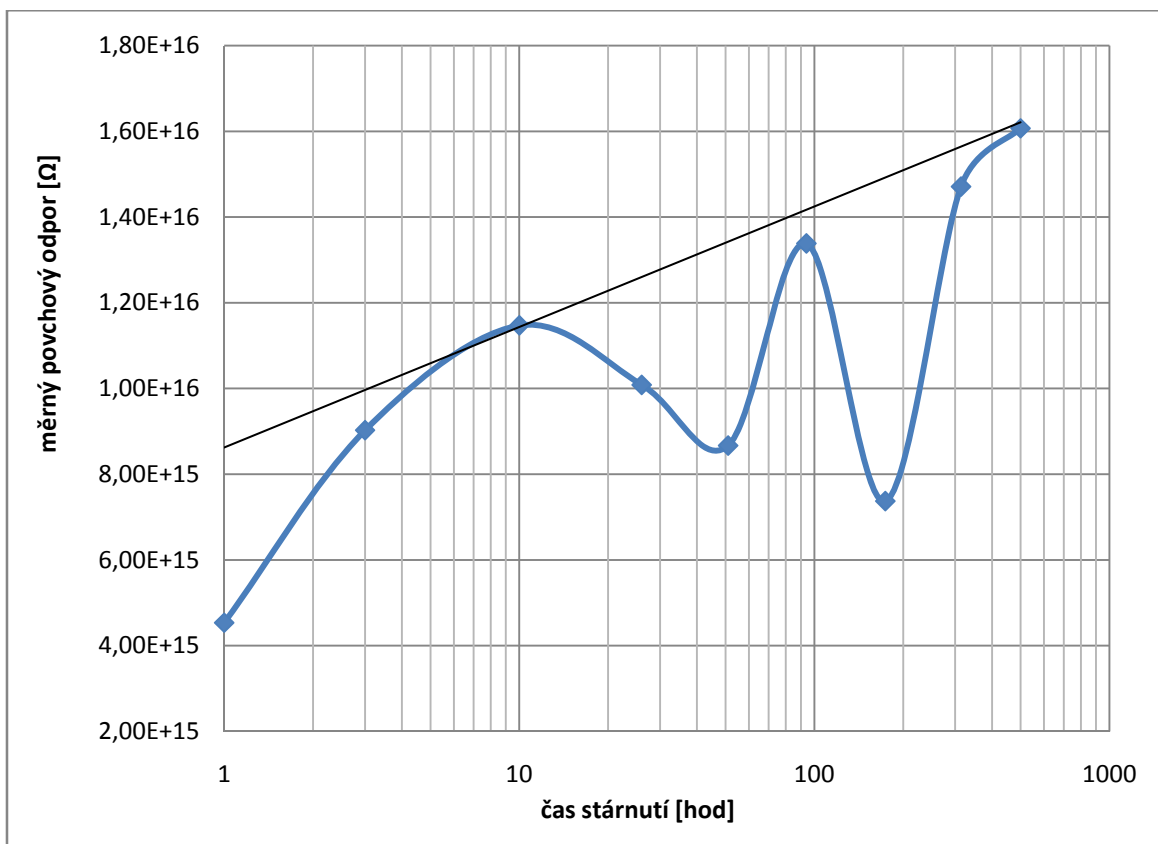
Obr. D1 Měrný povrchový odpor materiálu TPU



Obr. D2 Měrný povrchový odpor materiálu EVA

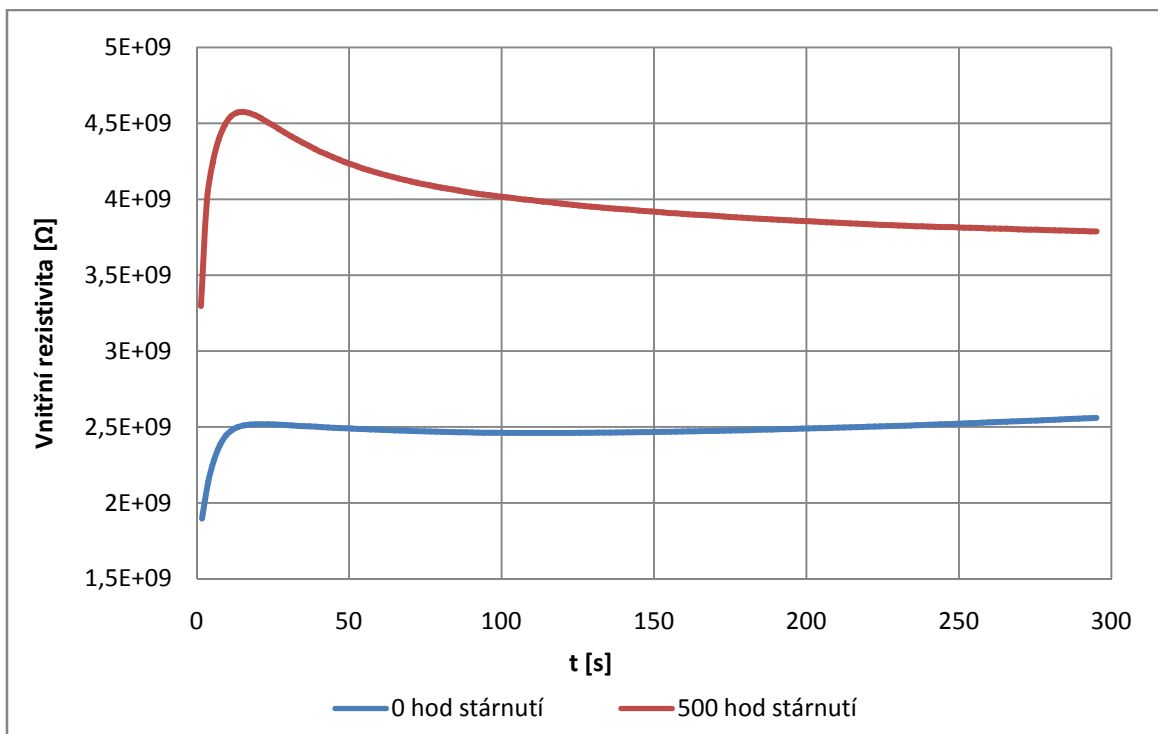


Obr. D3 Měrný povrchový odpor materiálu Epox 1

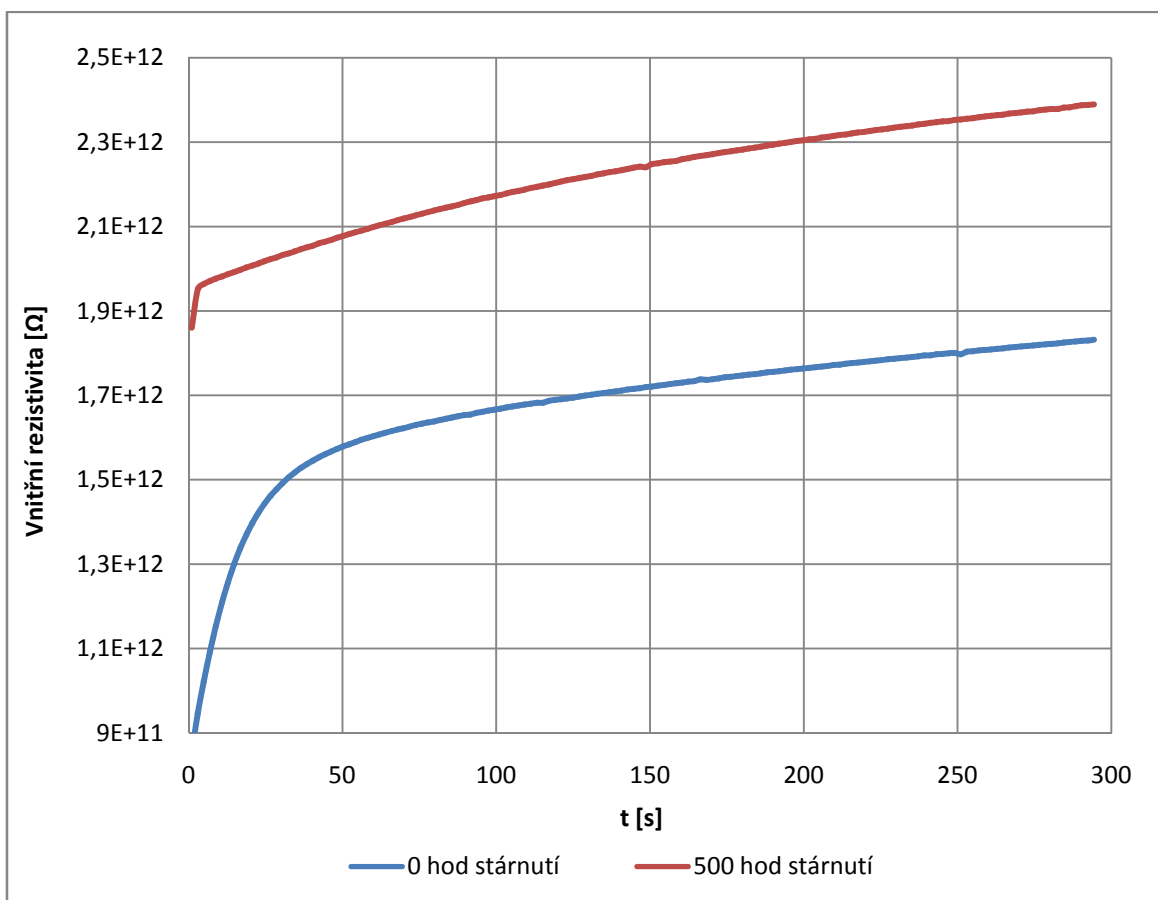


Obr. D4 Měrný povrchový odpor materiálu Epox 2

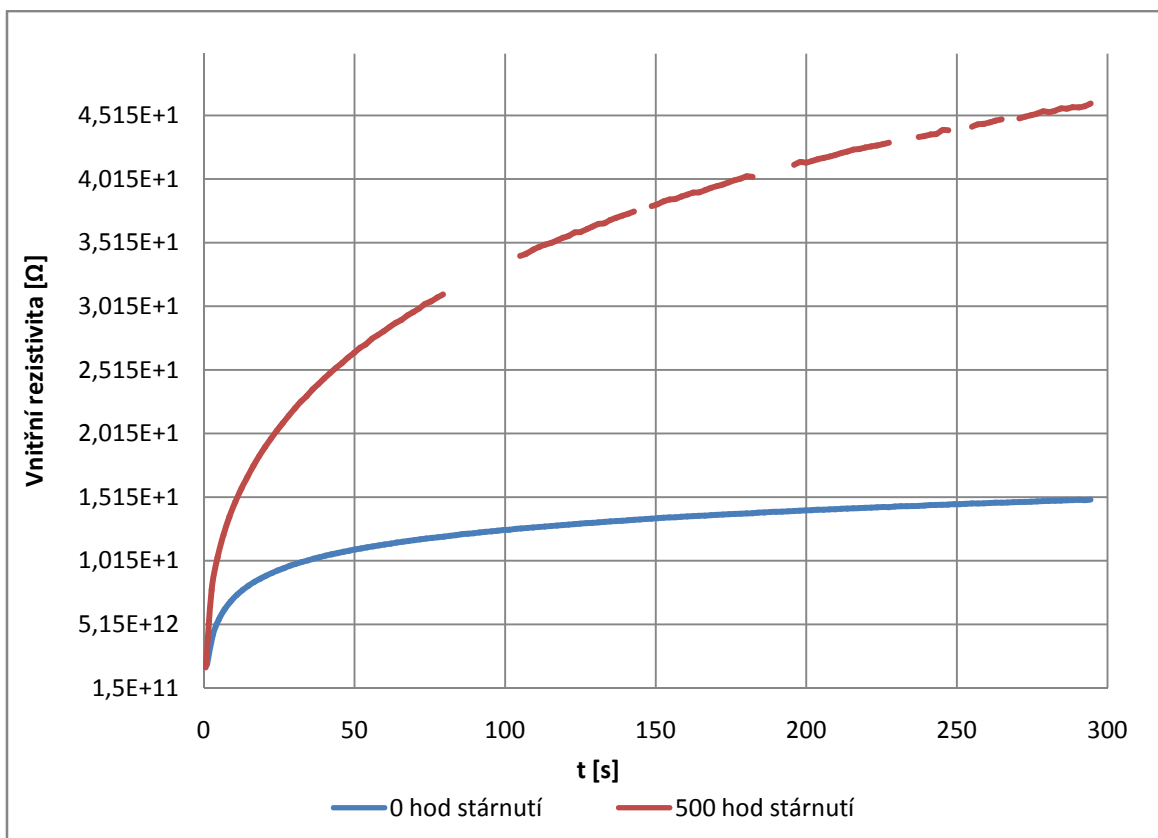
6.5 Příloha E



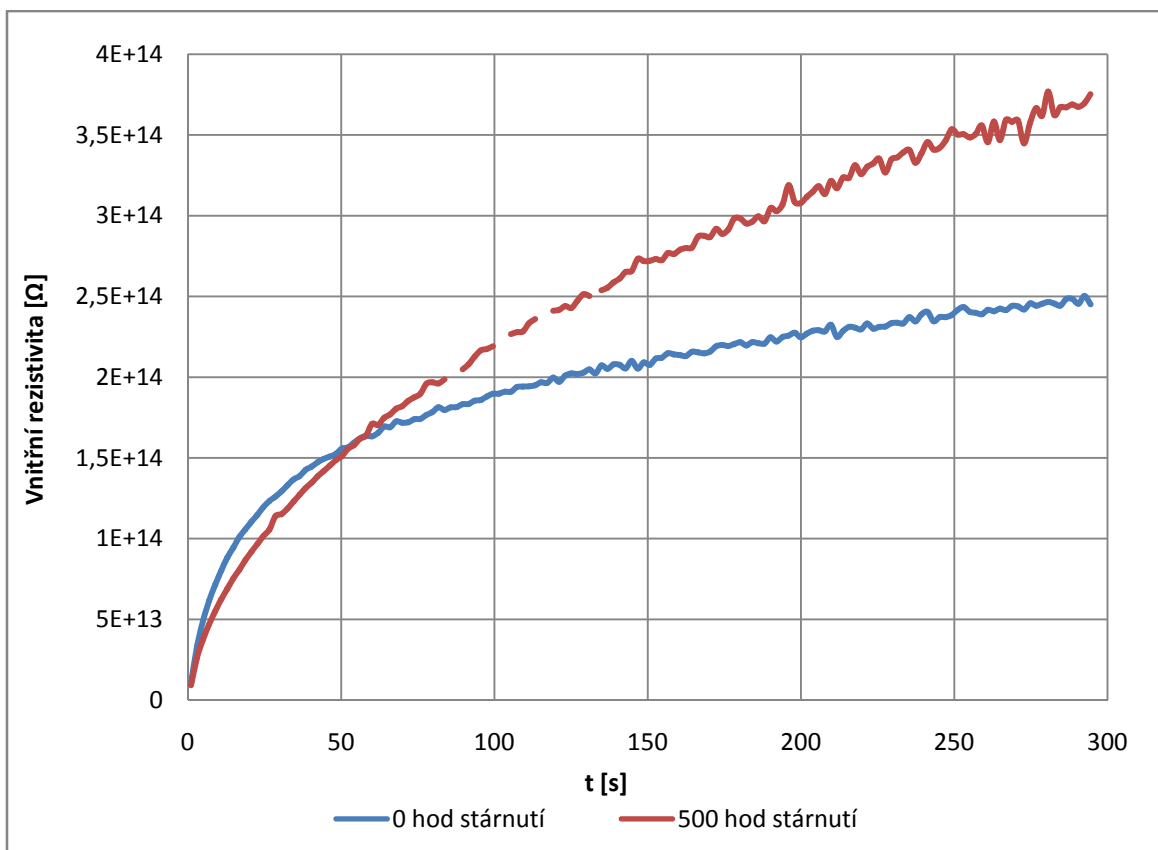
Obr. E1 Vnitřní odpor pro čas 0 – 300sec. materiálu TPU



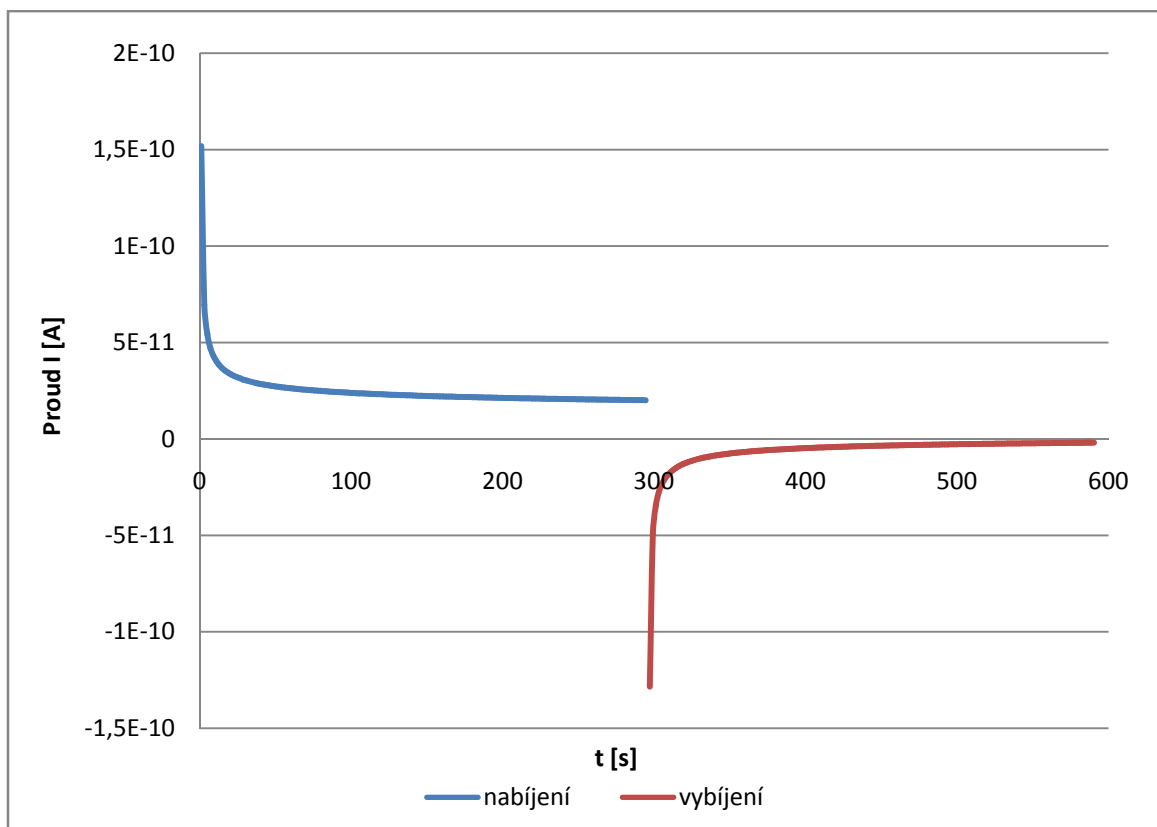
Obr. E2 Vnitřní odpor pro čas 0 – 300sec. materiálu EVA



Obr. E3 Vnitřní odpor pro čas 0 – 300sec. materiálu Epox 1



Obr. E4 Vnitřní odpor pro čas 0 – 300sec. materiálu Epox 2



Obr. E5 Nabíjecí a vybíjecí proud materiálu Epox 2